



**MODELAGEM DA BIOMASSA E DINÂMICA DO CARBONO EM ÁREAS DE  
CONCESSÃO FLORESTAL NO SUDESTE DA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

**ANA BEATRIZ DE FREITAS FERREIRA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB

FACULDADE DE TECNOLOGIA - FT

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL - EFL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**Modelagem da biomassa e dinâmica do carbono em áreas de concessão  
florestal no sudeste da Amazônia brasileira**

**Ana Beatriz de Freitas Ferreira**  
**Matrícula: 17/0054764**

**Orientador: Prof. Dra. Alba Valéria Rezende**  
**Coorientador: Msc. Lucas Mazzei de Freitas**  
**Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais**

**Publicação: PPGEFL. DM-2019**  
**Brasília/DF Maio de 2019**

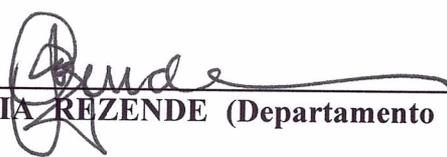
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

“MODELAGEM DA BIOMASSA E DINÂMICA DO CARBONO EM ÁREAS DE CONCESSÃO FLORESTAL NO SUDOESTE DA AMAZÔNIA BRASILEIRA”

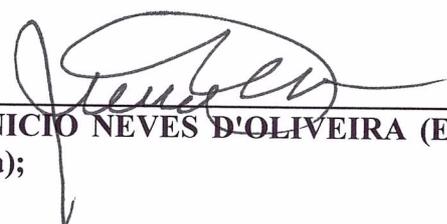
**ANA BEATRIZ DE FREITAS FERREIRA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> ALBA VALÉRIA REZENDE (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);  
(Orientadora)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. ERALDO APARECIDO TRONDOLI MATRICARDI (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);  
(Examinador Interno)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. MARCUS VINÍCIO NEVES D'OLIVEIRA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa);  
(Examinador Externo)

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. EDER PEREIRA MIGUEL (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB).  
(Examinador Suplente)

Brasília-DF, 22 de março de 2019.

## FICHA CATALOGRÁFICA

FAN532m Ferreira, Ana Beatriz  
Modelagem da biomassa e dinâmica do carbono em áreas de concessão florestal no sudeste da Amazônia brasileira / Ana Beatriz Ferreira; orientador Alba Valéria Rezende; co orientador Lucas Mazzei de Freitas. -- Brasília, 2019. 76 p.

Tese (Doutorado - Mestrado em Ciências Florestais) -- Universidade de Brasília, 2019.

1. LiDAR. 2. Incremento de Carbono. 3. Amazônia. 4. Estoque de Biomassa. 5. Concessão Florestal. I. Rezende, Alba Valéria, orient. II. Mazzei de Freitas, Lucas, co orient. III. Título.

## Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado força e determinação nesses dois anos do curso de mestrado. Descobri que a fé e a esperança são grandes forças que nos sustentam e nos impulsionam a continuar.

Agradeço a minha família que sempre me apoiou em meus projetos. Em especial, agradeço minha mãe Marli, que mesmo em meio as dificuldades dos últimos anos, foi gentil, compreensiva e motivadora, e, meu pai Rivailde, por todo amor e incentivo, mas, que infelizmente não pode presenciar a conclusão dessa conquista. À todos, o meu amor e a minha gratidão, pois, sempre me apoiaram em minhas escolhas, me dando amparo, suporte e carinho.

Agradeço aos amigos de caminhada, Larissa, João, Mariana, Maitê, Jonas, Gaby, Marcela, Maira, Samara, Cássio, Ana Liaffa e Renata, pelos ótimos momentos de alegria e desespero que passamos juntos. Vocês tornaram tudo mais interessante e agradável. Obrigada pela ajuda e pelo incentivo. Gostaria de agradecer, em especial, à Renata, amiga e parceira desde a época do TCC, que me ajudou a continuar nessa missão e, finalizar a dissertação. Choramos, rimos, desesperamos e agradecemos. Sem você acho que eu não teria conseguido! Sua presença e companheirismo foi essencial nessa etapa.

Obrigada ao meu professor Augusto de Pádua por me perguntar todas as segundas sobre “os meus dados”. Sua atenção e amizade foram importantes para me motivar a terminar o meu projeto!

Agradeço ao Serviço Florestal Brasileiro, nas pessoas do José Humberto e Charton, que disponibilizaram todos os dados que utilizei no meu trabalho, além da paciência e do tempo que dedicaram a me ensinar a desenvolver toda a minha metodologia. Esse trabalho não existiria sem a colaboração de vocês!

Muito obrigada a minha orientadora Alba Valéria pela compreensão, apoio e auxílio em todo esse tempo. Obrigada por ter me aceitado como orientada e por ter encarado comigo um tema tão desafiador. Minha eterna gratidão por toda a dedicação e amizade! Te admiro muito!

Agradeço ao meu coorientador Lucas Mazzei, que indicou o tema da pesquisa, que me orientou a executá-la e que me permitiu ter a oportunidade de trabalhar com um tema que sempre me encantou, Amazônia.

Obrigada a Camille Pioniot pela contribuição, que estava no Brasil e que veio para Brasília, apenas para me ajudar. Foi um grande prazer conhecê-la e poder contar com sua parceria. Aprendi muito contigo! Obrigada!

Gostaria de agradecer também aos membros da banca avaliadora, Eraldo Matricardi e Marcus Vinícios. Ao Eraldo por ser sempre esse companheiro e amigo que me deu grandes oportunidades desde a graduação. Sempre o terei como um grande orientador! E ao Marcus Vinícios, por todas as contribuições no meu trabalho antes e após as revisões. Foi uma grande honra tê-lo em minha banca!

Finalmente agradeço a UnB minha casa desde a graduação, ao Curso de Pós-graduação em Ciências Florestais da UnB pela oportunidade e a CAPES pela bolsa concedida.

**Dedico esse trabalho a minha mãe Marli e ao meu pai Rivalde**

## Resumo

A exploração de impacto reduzido tem sido uma importante alternativa de manejo florestal, visando promover a sustentabilidade da floresta e o resgate de carbono. Portanto, monitorar os estoques e a dinâmica de biomassa e carbono em florestas submetidas a exploração de impacto reduzido é necessário não apenas para avaliar a eficiência da exploração, mas, também para fornecer informações para criação de cenários climáticos e para o estabelecimento de projetos ambientais. Neste contexto, diversos métodos têm sido desenvolvidos para a obtenção de estimativas destes estoques, podendo ser destacada a tecnologia LiDAR. Portanto, o objetivo deste estudo foi quantificar a redução nos estoques de biomassa e carbono acima do nível do solo, em áreas de concessão florestal, a partir de dados LiDAR e, também, avaliar a dinâmica desses estoques após a exploração florestal seletiva. O estudo foi realizado nas Flonas de Jamari e Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia. Para a modelagem da biomassa foram utilizados dados de campo, de 58 unidades amostrais inventariadas nas duas Flonas, antes e após exploração, além de suas respectivas métricas oriundas de sobrevoo LiDAR. O método Stepwise foi utilizado na escolha das métricas que compõem o modelo selecionado, o qual foi escolhido com base no ranqueamento AIC, no coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajust) e no quadrado médio do erro (RMSE). A redução no estoque de biomassa foi obtida a partir da subtração de imagens antes e após a exploração. A ANOVA de medidas repetidas foi utilizada para avaliar a existência de diferenças significativas entre os estoques de biomassa antes e após exploração. A dinâmica do estoque de carbono foi avaliada na Flona de Jamari, em uma UPA (Unidade de Produção Anual) explorada em 2011 e em duas UPAs não exploradas. A partir de unidades amostrais virtuais monitoradas por meio de sobrevoos LiDAR, ao longo de 4 anos após a exploração da UPA (2011, 2013, 2014 e 2015), foi obtido o incremento em carbono. A ANOVA de medidas repetidas foi utilizada para avaliar diferenças no estoque e no incremento de carbono entre anos após a exploração e entre áreas (explorada e não explorada). O modelo de biomassa selecionado utiliza as métricas Elev.maximum e Elev.P40 e apresenta boas estatísticas de precisão, com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,67$  e erro padrão da estimativa dentro dos limites aceitáveis (RMSE = 41,94 Mg ha<sup>-1</sup>) igual a 16%. A Flona de Jacundá apresentou menor estoque de biomassa que a Flona de Jamari, contudo, ambas as Flonas apresentaram redução significativa na quantidade total de biomassa após a exploração. O estoque de carbono na UPA explorada em 2011, na Flona de Jamari, foi cerca de 15% menor que o valor registrado nas UPAs não exploradas. Durante o período monitorado (2011 a 2015), o incremento médio anual do estoque de carbono na UPA explorada foi igual a, aproximadamente, 0,91 Mg ha<sup>-1</sup>. Nas UPAs não exploradas não houve incremento de carbono, e, sim redução. Nas duas UPAs não exploradas, a redução no estoque de carbono foi igual a 1,30 Mg ha<sup>-1</sup> e 1,60 Mg ha<sup>-1</sup>. Os resultados indicam que houve maior captação de carbono na área submetida a exploração, o que pode estar relacionado ao crescimento dos indivíduos dos estratos inferiores, em decorrência da abertura de clareiras. Comparando o incremento do estoque de carbono ao longo do tempo entre as áreas exploradas e não exploradas, não foi observada diferença significativa (Pvalue < 0.05), indicando que a floresta explorada por meio de técnicas de impacto reduzido manteve a sua capacidade de incremento em carbono. Deste modo, com este estudo foi possível ajustar uma equação capaz de descrever a biomassa e carbono nas duas Flonas de Rondônia, bem como acompanhar o comportamento destas após a exploração seletiva.

**Palavras-chave:** Floresta Tropical, Fusion, Métricas, Concessão Florestal, Incremento.

## Abstract

Low impact logging has been an important forest management alternative to promote forest sustainability and carbon sequestration. Therefore, monitoring stock and dynamics of biomass and carbon in low-impact forests is necessary not only to assess the efficiency of the exploration, but also to provide information for the creation of climate scenarios and the establishment of environmental projects. In context, several methods have been developed to obtain estimates of these stocks, highlighting LiDAR technology. Thus, the objective of this study was to quantify the reduction of biomass and above ground carbon in forest concession in Rondônia using LiDAR data and to evaluate the dynamics of this stock after selective logging. Data from 58 sampled field units and metric data from LiDAR overflight, both before and after logging, were used to fit the model. The metrics of the model were selected by the Stepwise method. The best-adjusted allometric model was chosen based on AIC rank, adjusted coefficient of determination ( $R^2$  ajus) and mean square error (RMSE). The biomass reduction was obtained by subtracting the images before and after logging and a repeated measures ANOVA was used to evaluate if there was a difference between the stock in the two conditions (before and after logging). The study to evaluate the dynamics of the stock of carbon was carried out in Jamari's National Forest, in an UPA (Annual Production Unit) exploited in 2011 and in two not exploited UPAs. From the virtual sample units monitored by means of LiDAR flyovers, the increment in carbon was obtained over 4 years after the exploration of the UPA (2011, 2013, 2014 and 2015). The repeated-measures ANOVA was used to evaluate differences in stock and carbon increment between years after exploration and between areas (exploited and non-exploited). The selected model uses the Elev.maximum and Elev.P40 metrics and presents good accuracy statistics, with determination coefficient  $R^2 = 0.67$  and standard error of the estimate within acceptable limits (RMSE = 41.94 Mg ha<sup>-1</sup>) equal to 16%. Jacundá's forest presented lower biomass stock than Jamari's forest, however, both forests presented a significant reduction in the total amount of biomass after the selective logging. The carbon stock in the exploited UPA was about 15% lower than that recorded in the non-exploited UPAs. During the monitored period, the average annual increase of the carbon stock in the area explored was equal to approximately 0.91 Mg ha<sup>-1</sup>. However, in the non-exploited UPAs there was no carbon increment, but reduction. In non-exploited UPAs, the reduction was 1.30 Mg ha<sup>-1</sup> and 1.60 Mg ha<sup>-1</sup>, respectively. The results indicate that there was more carbon capture in explored area, which may be related to the growth of individuals in the lower strata, due to the opening of clearings. Comparing the increment of the carbon stock over time between the non-exploited and exploited areas, no significant difference (Pvalue <0.05) was observed, indicating that the forest exploited by reduced impact techniques maintained its capacity to increase carbon. Thus, with this study it was possible to adjust an equation capable of describing the biomass and carbon in the two forests of Rondônia, as well as to monitor the behavior of these after the selective exploration.

**Key Words:** Tropical Forests, Fusion, Metrics, Forest concession, Increment.

## Sumário

<b>1. Considerações Iniciais</b> .....	13
<b>1.1. Problema e questões de pesquisa</b> .....	14
<b>1.2. Objetivos</b> .....	16
1.2.1. <i>Geral</i> .....	16
1.2.2. <i>Específicos</i> .....	16
<b>1.3. Revisão de Literatura</b> .....	16
1.3.1. <i>Exploração madeireira em florestas tropicais</i> .....	16
1.3.2. <i>Exploração madeireira de impacto reduzido</i> .....	17
1.3.3. <i>Estimativa Carbono</i> .....	19
1.3.4. <i>Uso do LiDAR na quantificação da biomassa florestal</i> .....	20
<b>2. Modelagem da biomassa acima do solo em áreas de concessão florestal na Amazônia brasileira utilizando tecnologia LiDAR</b> .....	22
<b>2.1. Introdução</b> .....	22
<b>2.2. Metodologia</b> .....	24
2.2.1. <i>Área de estudo</i> .....	24
2.2.2. <i>Manejo e inventários nas Flonas</i> .....	25
2.2.3. <i>Obtenção de dados de campo</i> .....	26
2.2.4. <i>Obtenção de dados LiDAR</i> .....	27
2.2.5. <i>Estimativa de biomassa acima do solo (BAS)</i> .....	30
2.2.6. <i>Modelagem da biomassa com dados LiDAR</i> .....	31
2.2.7. <i>Estimativa da redução da biomassa nas áreas de concessão florestal</i> ....	32
<b>2.3. Resultados</b> .....	34
2.3.1. <i>Seleção das áreas para o ajuste do modelo</i> .....	34
2.3.2. <i>Seleção das métricas</i> .....	34
2.3.3. <i>Seleção do modelo de biomassa gerado a partir de dados LiDAR</i> .....	35
2.3.4. <i>Estimativa da redução da biomassa nas áreas de concessão após exploração</i> .....	39
<b>2.4. Discussão</b> .....	45
2.4.1. <i>Métricas do LiDAR</i> .....	45
2.4.2. <i>Modelo de biomassa ajustado</i> .....	46
2.4.3. <i>Estimativas de biomassa nas Flonas de Jamari e Jacundá</i> .....	47
<b>2.5. Conclusão</b> .....	48
<b>3. Interferência da exploração de impacto reduzido na dinâmica de carbono em floresta amazônica</b> .....	49
<b>3.1. Introdução</b> .....	49
<b>3.2. Metodologia</b> .....	50
3.2.1. <i>Caracterização da Área</i> .....	50

3.2.2.	<i>Coleta de dados</i> .....	52
3.2.3.	<i>Análise dos dados</i> .....	55
<b>3.3.</b>	<b>Resultados</b> .....	56
<b>3.4.</b>	<b>Discussão</b> .....	61
3.4.1.	<i>Estoque de Carbono</i> .....	61
3.4.2.	<i>Incremento e Dinâmica</i> .....	61
<b>3.5.</b>	<b>Conclusão</b> .....	63
<b>4.</b>	<b>Considerações finais: Revisitando as questões de pesquisa</b> .....	64
4.1.1.	<i>É possível estimar estoques de biomassa antes e após a exploração nas áreas submetidas a concessão florestal em Rondônia utilizando apenas métricas do LiDAR?</i> 64	
4.1.2.	<i>A aplicação do sistema de exploração de impacto reduzido nas Flonas de Rondônia diminui a quantidade de Biomassa total acima do solo nas áreas manejadas? A intensidade de exploração executada teve relação com a redução da biomassa??</i> .....	64
4.1.3.	<i>Como se comporta a dinâmica do estoque de carbono acima do solo nas Flonas de Rondônia, ao longo do tempo, após a exploração de impacto reduzido? Existe diferença significativa no estoque e no incremento de carbono acima do solo entre uma área com floresta explorada e uma área não explorada??</i> .....	64
<b>5.</b>	<b>Referências Bibliográficas</b> .....	65

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Informações das parcelas permanentes instaladas nas UPAs das UMFs da Flona de Jamari (JAM) e da Flona de Jacundá (JAC), incluindo datas dos inventários (medição e medição), datas da exploração e datas do sobrevoo com LiDAR.....	27
<b>Tabela 2:</b> Especificações técnicas dos voos LiDAR realizados sobre nas UMFs das Flonas de Jamari e Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia.....	28
<b>Tabela 3:</b> Métricas coletadas a partir dos sobrevoos LiDAR realizados nas UMFs das Flonas de Jamari e de Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia.....	30
<b>Tabela 4:</b> Resultados das análises de variância (ANOVA) comparando as Flonas de Jamari e de Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia, quanto ao estoque de biomassa acima do solo, antes da exploração ( $Mg\ ha^{-1}$ ), altura (Métrica Elev.mean) e o estoque de biomassa em função do tamanho da parcela (0,25 ha e 0,50 ha).....	33
<b>Tabela 5:</b> Modelos ajustados para estimativa da biomassa acima do solo (BAS) para as UMFs das Flonas de Jamari e Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia, incluindo as estatísticas de precisão como erro padrão da estimativa (RMSE), erro padrão da estimativa percentual (RMSE%), coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajus}$ ), índice de Akaike (AIC) e valor estatístico do teste T entre médias de duas amostras (Stat T).....	36
<b>Tabela 6:</b> Valores máximos, mínimos e média do estoque de biomassa nas UMFs I e III de Jamari e UMF I de Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia.....	39
<b>Tabela 7:</b> Resultados das análises de variância (ANOVA) de medidas repetidas no tempo, para avaliar a influência do tempo (antes e após exploração) no estoque de biomassa ( $Mg\ ha^{-1}$ ) na UMF I e UMF III da Flona de Jamari e na UMF I da Flona de Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia.....	40
<b>Tabela 8:</b> Estimativas de volume, biomassa e número de árvores explorados nas parcelas das UMFs localizadas nas Flonas de Jamari (JAM) e Jacundá (JAC), localizadas no Estado de Rondônia.....	42
<b>Tabela 9:</b> Especificações técnicas dos voos LiDAR realizados sobre nas UMFs da Flona de Jamari e Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia.....	54
<b>Tabela 10:</b> Datas de sobrevoo LiDAR nas três UPAs (1, 7 e 8) da UMF I da Flona de Jamari, no Estado de Rondônia.....	55
<b>Tabela 11:</b> Valores médio, mínimo e máximo de estoque de carbono e respectivos incrementos, estimados na UPA 1 (explorada em 2011) e nas UPAs 7 e 8 (não exploradas), localizadas na UMF I da Flona de Jamari, no Estado de Rondônia.....	57
<b>Tabela 12:</b> Resultado da análise de variância de medidas repetidas, comparando quantidade total de carbono estocado e incremento dos estoques de carbono nas UPAs explorada e não exploradas. Níveis de significância: significativo a 0,05 (*), não significativo (n.s).....	59

## Lista de Figuras

<b>Figura 1:</b> Localização da Flona de Jamari (azul) e Flona de Jacundá (rosa), localizadas no Estado de Rondônia, com a indicação das suas respectivas Unidades de Manejo Florestal (UMFs).....	24
<b>Figura 2:</b> Imagem demonstrativa da correção do arquivo vetorial de parcelas permanentes (quadrados azul e vermelho) com base na localização das árvores do inventário 100% (pontos verdes), região da copa (regiões brancas na imagem) e dados de parcela permanente (tabela).....	29
<b>Figura 3:</b> Grid e distribuição de parcelas para a obtenção das estimativas de estoques de biomassa e de redução de estoques de biomassa sobre a faixa de cobertura de dados LiDAR nas UMFs das Flonas de Jamari e de Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia. Parcelas com área igual a 4 hectares distribuídas nas UMFs I e III da Flona de Jamari e UMF I da Flona de Jacundá.....	33
<b>Figura 4:</b> Representação gráfica da correlação entre as métricas dos sobrevoos LiDAR e os correspondentes estoques de biomassa acima do solo, registrados nas UMFs das Flonas de Jamari e Jacundá em Rondônia.....	35
<b>Figura 5:</b> A – Representação gráfica da relação entre biomassa ( $Mg\ ha^{-1}$ ) observada e biomassa ( $Mg\ ha^{-1}$ ) predita nas UMFs das Flonas de Jamari e Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia; B - Resíduos percentuais em função de biomassa ( $Mg\ ha^{-1}$ ) predita; 3 - Distribuição de frequência dos resíduos em percentagem.....	38
<b>Figura 6:</b> Valores de estoque total de biomassa acima do solo (BAS) antes da exploração (Verde escuro) e após a exploração (Laranja) e valores de redução do estoque de biomassa (Cinza), registrados nas Flonas de Jamari e Jacundá.....	40
<b>Figura 7:</b> Mapa representando a redução da biomassa acima do solo para área de $1\ m^2$ , nas áreas das Flonas de Jamari e Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia. Mapa antes da exploração (1); Mapa após a exploração (2); Redução da biomassa, onde a imagem após a exploração foi subtraída da imagem antes da exploração (3); Destaque para áreas em que houve diminuição da biomassa (4).....	41
<b>Figura 8:</b> Correlação de Pearson indicando correlação significativa entre redução de biomassa e intensidade de exploração nas Flonas de Jamari e Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia.....	43
<b>Figura 9:</b> Redução do estoque de biomassa acima do solo nas UMFs das Flonas de Jamari e Jacundá sendo explicada por número de árvores exploradas por hectare (A), volume explorado em $m^3\ ha^{-1}$ e por estoque de biomassa explorado em $Mg\ ha^{-1}$ (C). Variáveis obtidas a partir de dados LiDAR e explicada por dados de exploração do inventário 100%. .....	44
<b>Figura 10:</b> Localização da Floresta Nacional do Jamari no Estado de Rondônia.....	51
<b>Figura 11:</b> Área de estudo localizada na Unidade de Manejo Florestal I (UMF 1) da Flona de Jamari. UPA explorada em 2010 (UPA 1) e UPAs não exploradas (UPA 7 e 8).....	52
<b>Figura 12:</b> Croqui das unidades amostrais de $100\ m \times 100\ m$ selecionadas aleatoriamente e mensuradas em cada UPA amostrada na UMF I.....	53
<b>Figura 13:</b> Estoque de carbono por unidade de área, obtido ao longo dos anos nas UPAs 1, 7 e 8 da UMF 1 da Flona de Jamari, localizada no Estado de Rondônia, indicando a diferença entre a área explorada (UPA 1) e as áreas não exploradas (UPAs 7 e 8) (A) e, a diferença na dinâmica de incremento de carbono entre os anos e entre as UPAs (B).....	58

## 1. Considerações Iniciais

Um problema recorrente em florestas tropicais como a Floresta Amazônica é a perda de biomassa e estoque de carbono causada pela exploração predatória de seus recursos, especialmente os madeireiros (VERÍSSIMO; LIMA; LENTINI, 2002). Essa perda interfere diretamente nos serviços ecossistêmicos prestados pela floresta, já que alterações na estrutura da floresta podem modificar a sua dinâmica (JARDIM; QUADROS, 2016), dependendo da intensidade e grau da exploração.

De uma forma geral, a exploração madeireira na Floresta Amazônica tem ocasionado altos níveis de impacto, considerando que, conforme registros, grande parte dessa atividade é ilegal e, conseqüentemente, não favorece a regeneração natural da vegetação remanescente, pois, práticas silviculturais adequadas não são utilizadas (FRANCEZ et al., 2013; SOUZA et al., 2015). Para tentar encontrar formas de minimizar os impactos gerados pela exploração sobre a Floresta Amazônica, o Serviço Florestal Brasileiro (SFB) implementou em 2007 as “concessões florestais” que são definidas pela lei Nº 11.284, de 2 de março de 2006 como:

*“Delegação onerosa, feita pelo poder concedente, do direito de praticar manejo florestal sustentável para exploração de produtos e serviços numa unidade de manejo, mediante licitação, à pessoa jurídica, em consórcio ou não, que atenda às exigências do respectivo edital de licitação e demonstre capacidade para seu desempenho, por sua conta e risco e por prazo determinado.”*

As concessões florestais adotaram o sistema de manejo policíclico baseado na exploração planejada de árvores selecionadas de grande porte. Entretanto, embora o sistema proposto para as concessões seja normatizado e baseado em evidências científicas, a atividade de exploração causa impactos na floresta remanescente.

Apesar do uso do sistema de exploração conhecido como exploração de impacto reduzido (EIR) ser considerado uma forma eficiente de minimizar os danos sobre a floresta remanescente, estudos têm mostrado que os impactos da exploração ainda são relevantes, sendo ocasionados, sobretudo, pela queda das árvores cortadas e, também, pelo uso de máquinas pesadas no arraste e transporte das árvores abatidas, que geram uma densa malha de trilhas de arraste e ampliam a área degradada (MELLO-IVO; ROSS, 2006).

Por outro lado, é importante destacar que a retirada de biomassa florestal decorrente da exploração não causa impactos apenas na estrutura da floresta, mas, sim, em todo o ecossistema (FRANCEZ et al., 2013), pois, a exploração florestal acarreta em emissões de carbono para a atmosfera, que contribuem na formação dos gases de efeito estufa numa escala global (LEI et al., 2018; PAN et al., 2011; UNFCCC, 2009). Assim, é importante que se acompanhe todo o processo de extração de madeira nas áreas de concessão florestal, não apenas para fiscalizar a atividade, mas, especialmente, para entender a dinâmica da floresta e quantificar os impactos após a exploração (PUTZ et al., 2008).

Diferentes métodos têm sido utilizados para calcular e comparar os impactos da exploração madeireira na Floresta Amazônica sobre a vegetação remanescente, considerando tanto o uso de técnicas de manejo de impacto reduzido quanto o manejo convencional. Para isso tem-se utilizado recursos como dados de inventário e imagens de satélite (UNFCCC, 2009). Dentre os principais métodos, pode se destacar o mapeamento da infraestrutura implantada nas áreas de concessão, pois a partir deste é possível calcular a biomassa total retirada da floresta para a extração de madeira, pois, a construção de estradas e pátios implica na retirada de vegetação, configurando impacto direto sobre a vegetação (LOCKS, 2017). Outro método indicado é a análise da dinâmica de clareiras devido a existência de evidências sobre a alta correlação entre abertura de clareiras e retirada de árvores (FRANCEZ et al., 2013; MENDES et al., 2013; LOCKS, 2017).

Além do mapeamento da infraestrutura implantada em áreas de concessão e da dinâmica das clareiras, a estimativa de emissão de carbono em áreas exploradas é outra importante forma de quantificar o impacto da exploração (ASNER et al., 2009; GIANNICO et al., 2016). Contudo, apesar da existência dos mais diversos métodos que vêm sendo usados para quantificar os impactos da exploração, ainda não se conhece todos os efeitos da exploração sobre a vegetação remanescente e sobre o ecossistema (MARTIN et al., 2015).

## **1.1. Problema e questões de pesquisa**

A Floresta Amazônica possui grande importância econômica para o Brasil devido, principalmente, a quantidade e qualidade de madeira de interesse comercial disponível (ASNER et al., 2005). Por outro lado, a expansão do mercado moveleiro e principalmente da construção civil, impulsionada pela disponibilidade de espécies madeireiras de

interesse econômico, tem fomentado a exploração madeireira na região, muitas vezes ilegal (ASNER et al., 2005; MATRICARDI, 2007). Isto contribui, conseqüentemente, com o aumento das taxas de desmatamento e com degradação da floresta (MATRICARDI et al., 2013).

Diante desta situação, algumas formas de exploração florestal associadas com a manutenção do equilíbrio dinâmico e a integridade da floresta vêm sendo testadas em florestas primárias e florestas já exploradas (BOLTZ; HOLMES; CARTER, 2003; HOLMES et al., 2002). Uma delas é a exploração de impacto reduzido, cujo principal objetivo é minimizar os impactos da extração madeireira sobre a vegetação remanescente (HENDRINSON, 1989). Para avaliar a eficiência dessa forma de exploração, estudos relacionados a estimativas de estoque de carbono ao longo do tempo, antes e após a exploração, vêm sendo desenvolvidos nas áreas exploradas, principalmente devido a importância dessa variável nas negociações internacionais de crédito de carbono e na mitigação de gases de efeito estufa (RIBEIRO et al., 2009; ZOLKOS; GOETZ; DUBAYAH, 2013). Além disso, tecnologias inovadoras como o LiDAR devem ser testadas nessa situação, visando contribuir, sobretudo, na otimização do levantamento de dados e nos processos de predição, já que os métodos tradicionais de obtenção de dados, apesar de serem de alta confiabilidade, envolvem mais tempo e maior quantidade de recursos financeiros e humanos (ASNER et al., 2004; LENTINI et al., 2009).

Nesse sentido, a presente dissertação busca responder algumas questões relacionadas ao problema desta pesquisa:

a) É possível estimar estoques de biomassa nas áreas submetidas a concessão florestal em Rondônia utilizando apenas métricas do LiDAR?

b) A aplicação do sistema de exploração de impacto reduzido nas Flonas de Rondônia diminui a quantidade de Biomassa total acima do solo nas áreas manejadas? A intensidade de exploração executada tem relação com a redução da biomassa?

c) Como se comporta a dinâmica do estoque de carbono acima do solo nas Flonas de Rondônia, ao longo do tempo, após a exploração de impacto reduzido? Existe diferença significativa no estoque e no incremento de carbono acima do solo entre uma área com floresta explorada e uma área não explorada?

As respostas destas questões estão apresentadas em dois capítulos que compõem essa dissertação, ou seja:

- Capítulo I: Modelagem da biomassa acima do solo utilizando tecnologia LiDAR em concessões florestais na Amazônia

- Capítulo II: Influência da exploração de impacto reduzido na dinâmica de carbono na Floresta Amazônica.

## **1.2. Objetivos**

### *1.2.1. Geral*

Quantificar a redução de biomassa e carbono acima do nível do solo em áreas de concessão florestal nas Flonas de Rondônia utilizando dados LiDAR e avaliar a dinâmica desse estoque após a exploração florestal seletiva.

### *1.2.2. Específicos*

- Quantificar a biomassa acima do nível do solo, antes e após a exploração madeireira, em áreas de concessão florestal nas Flonas de Rondônia, utilizando dados LiDAR e dados de parcelas permanentes;
- Comparar o incremento do estoque de carbono acima do nível do solo, considerando uma área explorada e uma área não explorada seletivamente.

## **1.3. Revisão de Literatura**

### *1.3.1. Exploração madeireira em florestas tropicais*

As florestas tropicais são fundamentalmente importantes para o planeta. Além de serem responsáveis por grande parte da diversidade biológica e genética existente no mundo, desempenham importante papel na regulação do clima global, mantendo o equilíbrio das chuvas e das temperaturas a partir das trocas gasosas (VAN DER SANDE et al., 2017). No entanto, o potencial econômico dessas florestas fomenta a exploração madeireira predatória, levando a redução da biomassa, dificultando a sustentabilidade da floresta e comprometendo os serviços ecossistêmicos prestados (JARDIM; QUADROS, 2016; NOBRE; SELLERS; SHUKLA, 1991).

A exploração de florestas tropicais tem gerado muitas discussões, principalmente em relação aos impactos causados na vegetação remanescente e as intensas modificações registradas nesses ecossistemas (VERÍSSIMO, A.; LIMA, E.; LENTINI, 2002). A utilização dos recursos das florestas tropicais de forma sustentável é uma prática complexa devido não apenas à grande variação existente na estrutura dessas florestas,

mas, também devido à grande riqueza de espécies, dificultando, assim, a escolha de sistemas adequados de manejo silvicultural (CARVALHO, 1999).

A exploração florestal é caracterizada pelos processos de derrubada de árvores, arraste das toras, abertura de pátio de estocagem e transporte da madeira. Esses processos interferem fortemente na estrutura da floresta (HENDRINSON, 1989), podendo comprometer a sua sustentabilidade. Historicamente, a intensidade de exploração varia em função da importância econômica das espécies presentes na floresta e do uso dessas espécies na região (IFT, 2014).

Ao longo do tempo novas formas de exploração madeireira foram se estabelecendo e levando ao desenvolvimento de alguns conceitos de exploração. A exploração caracterizada como “convencional” está relacionada a retirada de indivíduos sem estudo e planejamento prévio. Trata-se do mais antigo meio de exploração florestal (ASNER et al., 2009). Apesar de ser considerada ilegal na atualidade, a exploração convencional continua sendo a mais comumente utilizada (GREENPEACE, 1999). Nesse tipo de exploração, por não existir planejamento, todas as árvores de interesse são derrubadas acarretando em grande desperdício de madeira, já que não são definidas técnicas apropriadas tanto para a abertura de trilhas de arraste e estradas, quanto para a derrubada das árvores (BARRETO et al., 1998). No Brasil, a Floresta Amazônica tem apresentado altas taxas de degradação devido a exploração convencional predatória (INPE, 2016). Hectares de florestas foram explorados, sem manejo adequado, provocando danos e alterações biofísicas na vegetação, reduzindo o crescimento das árvores remanescentes e inibindo a capacidade de regeneração da floresta (VIDAL; VIANA; FERREIRA BATISTA, 2002). Nesse contexto, a partir da necessidade de minimizar o desperdício e os impactos sobre a vegetação remanescente, a exploração de impacto reduzido (RIL- Reduced Impact Logging) se apresentou como uma nova perspectiva para o avanço do setor florestal brasileiro, sendo introduzida a partir da Lei de Gestão de Florestas Públicas, ou LGFP (Lei Federal 11.284, de 02/03/2006) (IFT, 2014).

### *1.3.2. Exploração madeireira de impacto reduzido*

A exploração de impacto reduzido está inserida nos MDL (Mecanismos de Desenvolvimento Limpo) e são técnicas aplicadas em sistemas silviculturais policíclicos que visam minimizar impactos sobre a vegetação remanescente (SCHWARTZ; FALKOWSKI; PEÑA-CLAROS, 2017). A eficiência da RIL em minimização de

impactos frente as técnicas de manejo convencionais tem sido verificada em diversos estudos (BOLTZ; HOLMES; CARTER, 2003; HOLMES et al., 2002; SCHWARTZ; FALKOWSKI; PEÑA-CLAROS, 2017).

A estrutura da RIL foi desenvolvida a partir de alguns conceitos envolvendo dinâmica de desenvolvimento e crescimento das florestas tropicais, sucessão florestal e dinâmica de clareiras. Estes conceitos fornecem a base para definição de parâmetros para o manejo de fragmentos florestais (ENGEL, 1993). A medida que as árvores crescem, morrem e são substituídas, o dossel da floresta é modificado. Assim, a dinâmica resulta em estágios diferentes, que geram um mosaico na floresta (FRANCEZ et al., 2013).

Entre as práticas que compõem a RIL, destacam-se as derrubadas direcionais e o mapeamento das árvores, dos cursos de água e da topografia (PUTZ et al., 2008). As atividades da exploração de impacto reduzido se dividem em três fases distintas para cada ciclo de corte (IBAMA, 2007), ou seja:

- Pré-exploratória: Nesta fase, os talhões a serem explorados são definidos; a infraestrutura (pátios, estradas e trilhas de arraste) é planejada e construída; são implantadas as parcelas permanentes para o monitoramento da vegetação; o inventário florestal 100% é realizado e as árvores de interesse comercial são selecionadas; os primeiros tratamentos silviculturais são realizados, como, por exemplo, a remoção de cipós para facilitar a retirada dos indivíduos escolhidos.
- Exploratória: Nesta etapa, as árvores a serem abatidas são sinalizadas; é realizado o corte com direcionamento da queda; é feito o arraste das toras até o pátio onde estas serão processadas e traçadas.
- Pós-exploratória: Esta fase inicia um ano após a exploração; a realização de alguns tratamentos silviculturais ocorre para preparar as árvores para o próximo ciclo de corte; é feita a avaliação do impacto e do desperdício gerado pela exploração; as parcelas permanentes são remeidas; é feita a proteção e recuperação da área explorada; é realizada a manutenção da infraestrutura.

As atividades realizadas em cada uma das fases do processo de exploração de impacto reduzido, permitem que a floresta se recupere e possa ser explorada novamente. A retirada de toras segundo os moldes de impacto reduzido, abre clareiras não naturais que propiciam a entrada de luz que favorece o incremento em altura e diâmetro das árvores remanescentes (REIS et al., 2014). Com o tempo, as clareiras são fechadas e o dossel da floresta é reestabelecido, proporcionando a regeneração da floresta (FRANCEZ

et al., 2013). Estruturalmente é possível observar mudanças na fase pós-exploratório da floresta. Entretanto, entender e identificar se a regeneração da floresta equivale ou supera o que foi retirado, ainda é uma atividade desafiadora em decorrência da dificuldade de obtenção de informações, devido ao extenso trabalho de campo ou as limitações dos equipamentos e condições climáticas que interferem na qualidade de imagens (HENDRINSON, 1998; PINAGÉ; MATRICARDI, 2015).

### *1.3.3. Estimativa Carbono*

O cenário das mudanças climáticas apresentado durante a ECO-92 iniciou discussões entre as nações, no sentido de estabelecer medidas para a redução dos gases de efeito estufa (GEE).

No Brasil, o desmatamento é uma das principais fontes de emissão de GEE, o que interfere tanto no clima regional quanto global. Estudos têm comprovado que nos períodos em que houve redução do desmatamento, houve também redução na emissão de gases (SEEG & OCF, 2016).

O CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) é um dos principais GEE. O Protocolo de Quioto determinou a tonelada de CO<sub>2</sub>eq (dióxido de carbono equivalente) como moeda para as negociações da redução de GEE e definiu três mecanismos de Mercado para o carbono. Um deles é o MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo), que foi direcionado para o desenvolvimento de projetos com redução de emissões por países em desenvolvimento (UNITED NATIONS, 2007) e a RIL está incluída nesse mecanismo.

A estimativa de estoque de carbono tem sido usada como referência na implantação de projetos florestais no MDL (RIBEIRO et al., 2009) e, conseqüentemente, para controlar e medir a exploração florestal. Deste modo, a estimativa de estoque de carbono passou a ser um eficiente mecanismo de monitoramento (ZOLKOS; GOETZ; DUBAYAH, 2013). Grande parte das negociações de redução de GEE tem sido feita em torno dos dados de estoque e sequestro de carbono.

Portanto, modelar a distribuição espacial de biomassa com acurácia local é importante para reduzir as incertezas sobre as emissões e o sequestro de carbono de uma região (FOODY, 2003). A World Wide Fund For Nature (WWF) definiu que a qualidade, densidade e a quantidade líquida de carbono nas florestas definiriam a liberação de autorização de desmatamento em uma área. Logo, a medida que essas taxas de estoque de carbono diminuíssem, a restauração florestal seria oferecida como medida compensatória. (WWF, 2009).

Estudos que quantificam o carbono estocado em diferentes estágios de sucessão são de grande relevância para projetos de florestamento e reflorestamento no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, pois, além de atuarem como estratégia de monitoramento, ainda contribuem nas estimativas do balanço global de carbono (MALHI; BALDOCCHI; JARVIS, 1999). Outro ponto está relacionado a estimativa da quantidade de créditos de carbono gerada após determinado período fomentando o mercado de créditos de carbono. Deste modo, estudos de carbono são importantes, pois, contribuem para avaliar tanto benefícios ambientais quanto econômicos (RIBEIRO et al., 2009).

A principal base de cálculo de crédito de carbono oriundo de redução de desmatamento está vinculada às áreas de floresta e aos estoques de carbono observados e medidos em campo. Os quantitativos de carbono são realizadas em florestas intactas, e também em florestas recém exploradas (WANG et al., 2011; MEYER et al, 2013; JOHNSON et al., 2016). Dados de carbono armazenados ao longo do tempo permitem a criação de cenários e predições de estoques que podem ser muito úteis nas negociações e definição de projetos de exploração florestal e mitigação de gases poluentes (FEARNSIDE et al., 2009).

Desta forma, acompanhar a dinâmica de carbono nas florestas é uma importante atividade visto que pequenas mudanças nesse processo interferem fortemente no ciclo global de carbono (MALHI; BALDOCCHI; JARVIS, 1999).

#### *1.3.4. Uso do LiDAR na quantificação da biomassa florestal*

Muitas vezes, a coleta de dados de campo em ambientes florestais é inviabilizada em função de alguns fatores relacionados a tempo, recursos financeiros disponíveis, dificuldades de acesso ao local entre outros. Diante desta situação, novas tecnologias têm sido utilizadas, para tentar minimizar esses problemas, gerando as informações necessárias, com níveis de precisão aceitáveis. Neste caso, o sensoriamento remoto tem se destacado como ferramenta útil e eficiente (HOUGHTON, 2012).

Especificamente no caso da exploração florestal na Floresta Amazônica, as vistorias em campo e o uso de imagens de satélite não têm sido capazes de calcular a quantidade de madeira efetivamente extraída, contrapondo com o volume autorizado (LOCKS, 2017). Este é, de fato, um grande problema para o setor madeireiro na região. De uma forma geral, os sensores apresentam grandes dificuldades em detectar a

exploração seletiva devido a vasta cobertura florestal na Amazônia (PINAGÉ; MATRICARDI, 2015).

Diante desta situação, a tecnologia LiDAR surge como uma ferramenta eficiente capaz de atender essa demanda, já que essa tecnologia consegue penetrar no dossel das florestas (JENSEN, 2009). Desta maneira é possível obter informações precisas do sub-bosque da floresta e da topografia do terreno (JENSEN et al., 2008).

O LiDAR gera uma nuvem de pontos capaz de extrair grande quantidade de informações, com destaque para as métricas que são geradas, e que podem ser de contagem de retornos, elevação ou altura e intensidade e densidade de retornos (UNITED STATES FOREST SERVICE – USFS, 2014), favorecendo a determinação de medidas diretas como altura e a estimativa de parâmetros importantes como biomassa (DUBAYAH et al., 2000).

## 2. Modelagem da biomassa acima do solo em áreas de concessão florestal na Amazônia brasileira utilizando tecnologia LiDAR

### Resumo

O monitoramento da exploração madeireira bem como o levantamento dos estoques de biomassa e carbono em florestas tropicais são de fundamental importância no contexto mundial, considerando o valor destas florestas no cenário econômico e ecológico, em especial na regulação climática através do estoque de carbono. Neste contexto, diversos métodos têm sido desenvolvidos para a obtenção de estimativas destes estoques, podendo ser destacada a tecnologia LiDAR. Deste modo, o objetivo deste estudo foi quantificar a biomassa acima do solo antes e após a exploração, a partir de métricas do LiDAR, para duas Flonas sob concessão florestal, localizadas no Estado de Rondônia, isto é, Flona Jacundá e Flona Jamari. Foram utilizados dados de 58 unidades amostrais inventariadas em campo e métricas oriundas de sobrevoo LiDAR, ambos antes e após exploração para o ajuste do modelo. As métricas que compõem o modelo foram selecionadas pelo método *Stepwise*. O melhor modelo alométrico ajustado foi escolhido com base no ranqueamento AIC, no coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajust) e no quadrado médio do erro (RMSE). O modelo selecionado utiliza as métricas Elev.maximum e Elev.P40 e apresenta boas estatísticas de precisão, com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,67$  e erro padrão da estimativa dentro dos limites aceitáveis (RMSE = 41,94 Mg ha<sup>-1</sup>) igual a 16%. A Flona de Jacundá apresentou menor estoque de biomassa que a Flona de Jamari, contudo, ambas as Flonas apresentaram redução significativa na quantidade total de biomassa após a exploração. A redução foi na ordem de 3% em Jamari e de 1% em Jacundá. Apesar da redução em biomassa ter sido pouco explicada pela intensidade de exploração, houve boa correlação. Logo, a diferença encontrada quanto a redução da biomassa pode estar relacionada a intensidade de exploração realizada em cada Flona.

**Palavras-chave:** Floresta Tropical, Fusion, Métricas, Concessão Florestal.

### 2.1. Introdução

As florestas tropicais têm recebido atenção especial nas últimas décadas considerando não apenas a sua importância ecológica e o seu papel no controle do clima (IPCC, 2014; SOUZA et al., 2015; WWF, 2009), mas, também sua importância econômica, já que possuem produtos madeireiros e não madeireiros, de alto valor agregado. No entanto, estas florestas também têm sido cenário de altas taxas de degradação, com redução na biomassa aérea (VERÍSSIMO, A.; LIMA, E.; LENTINI, 2002) e emissões de gases poluentes na atmosfera, especialmente o dióxido de carbono (HEROLD; SKUTSCH, 2011; IPCC, 2014; SEEG & OCF, 2016).

Diante desta situação, a Conferência das Partes das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) estabeleceu que seria necessário conservar os estoques de carbono dessas florestas, bem como incentivar o manejo sustentável da floresta como mecanismo de minimização de emissões de gases de efeito estufa na atmosfera (UNFCCC,

2010). Desta forma, a medição e o monitoramento do carbono e da biomassa aérea se tornaram importantes ferramentas de acompanhamento da extração florestal e de estimativas de emissão e estoque de carbono (ZOLKOS; GOETZ; DUBAYAH, 2013). Além disso, é fundamental a existência de modelos alométricos precisos, capazes de descrever a biomassa florestal, auxiliando na diminuição das incertezas de estimativas do ciclo de carbono, de modo a contribuir no orçamento global de carbono e na conservação florestal (FOODY, 2003; HEROLD; SKUTSCH, 2011).

Diversos estudos têm desenvolvido modelos de predição da biomassa a partir de sensores remotos e perfilamento a laser LiDAR (FERRAZ et al., 2016; BECKNELL et al., 2018; KNAPP; FISCHER; HUTH, 2018;) e a associação de métricas oriundas do LiDAR com dados de parcelas de campo tem gerado bons resultados para a estimativa de biomassa e carbono acima do solo (D'OLIVEIRA et al., 2012; LEITOLD et al., 2015; LONGO et al., 2016). Isto resulta na obtenção mais ágil e precisa de informações de exploração florestal e estimativas de estoque de carbono (LOCKS, 2017).

O LiDAR já se mostrou uma ferramenta superior as imagens de satélite com resultados mais precisos (FENG et al., 2017). Desta maneira, a obtenção da quantidade de biomassa a partir de dados LiDAR aerotransportado se torna interessante, pois, além de reduzir custos com inventário florestal, reduz o tempo para a obtenção das informações.

No Brasil, o Serviço Florestal Brasileiro (SFB) possui atribuição de gerir a concessão florestal nas florestas nacionais brasileiras, exigindo vigilância constante sob as atividades realizadas nas Flonas (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2016). Devido a esta necessidade e também a importância de monitorar os estoques de carbono das florestas, este estudo foi realizado com o objetivo de quantificar a biomassa acima do solo antes e após a exploração, a partir de métricas do LiDAR, para duas Flonas sob concessão florestal, localizadas no Estado de Rondônia



### *Flona de Jamari*

A região da Flona de Jamari possui relevo aplainado nível II e ocorre sobre rochas do embasamento cristalino. O solo predominante na região é o Latossolo e o clima é o Am – Tropical de monção (Köppen), com período seco bem definido durante o inverno, entre os meses junho e agosto, e período mais chuvoso entre os meses de outubro a abril. A vegetação predominante nesta Flona é a Floresta Tropical Ombrófila Densa, com faixas de Floresta Ombrófila Aberta, podendo apresentar palmeiras ou cipós. A vegetação é rica em espécies arbóreas com presença de grupos de palmeiras, lianas lenhosas e epífitas. O sub-bosque é composto por plântulas e árvores jovens (IBAMA, 2005; SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2017b)

### *Flona de Jacundá*

A região da Flona de Jacundá apresenta relevo formado principalmente por planícies aluviais e superfícies de aplainamento. De modo geral, o solo é formado predominantemente por Latossolo Vermelho-amarelo, que ocupa 37% da área total da Flona, seguido pelos solos aluviais (29%). O clima local é classificado como Am – Tropical de monção, com duas estações climáticas distintas, sendo uma chuvosa (outubro a abril), com precipitação mensal acima de 300 mm e outra seca. As temperaturas são altas durante todo ano, com baixa amplitude térmica. A vegetação é representada, principalmente, por Floresta ombrófila aberta e Floresta ombrófila densa (ICMBIO, 2010).

#### *2.2.2. Manejo e inventários nas Flonas*

A Flona de Jamari foi a primeira a ser submetida a concessão florestal. As empresas Madeflona Industrial Madeireira, Sakura Indústria e Comércio de Madeiras e Amata venceram as licitações e foram responsáveis, respectivamente, pelo manejo das UMFs (Unidades de Manejo Florestal) I, II e III, estabelecidas na área (Figura 1). A Flona começou a ser explorada em 2010, com intensidade média de 12,79 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para toda a Flona, intensidade média de 15,57 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> na UMF I, 9,53 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> na UMF II e 11,68 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> na UMF III, incluindo apenas árvores com DAP (diâmetro a altura do peito) igual ou superior a 50 cm (MUHLBAUER, 2017).

A Flona de Jacundá foi submetida a concessão florestal em 2009 e a Madeflona Industrial Madeireira foi a única empresa responsável pelo manejo das duas UMFs

implantadas nessa Flona, ou seja, UMF I e UMF II. A exploração iniciou em 2013 e considerou apenas árvores de interesse comercial e com DAP  $\geq 40$  cm. A intensidade média de exploração na UMF I foi de  $10,48 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  e a Flona toda obteve média de  $10,25 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  explorados. Entretanto, para o estudo foi utilizada a UPA 3 da UMF I, devido a disponibilidade de dados, a qual obteve média de exploração igual a  $7,65 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ .

Antes da exploração nas duas Flonas, alguns processos foram realizados para o cumprimento do Plano Operacional Anual (POA) e para o cumprimento das designações do Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS). Portanto, inicialmente foi feito o inventário florestal 100%, em que todos os indivíduos arbóreos de interesse comercial e com DAP  $\geq 40$  cm foram contabilizados e identificados botanicamente ao nível de espécie. Alguns meses antes da realização da exploração foram implantadas parcelas permanentes em cada Flona, visando o monitoramento da vegetação quanto as respostas das florestas à exploração. Portanto, todos os indivíduos arbóreos de cada parcela permanente foram mensurados antes e após a exploração, de acordo com os critérios de inserção estabelecidos em cada Flona. Além disso, houve abertura de estradas, trilhas de arraste e pátios de armazenamento visando facilitar o processo de extração da madeira com o menor impacto possível. Foi também realizado o corte de cipós antes da exploração propriamente dita (MUHLBAUER, 2017).

### 2.2.3. *Obtenção de dados de campo*

Os dados de cada parcela permanente e do inventário 100% foram obtidos pelo Serviço Florestal Brasileiro (SFB) diretamente com as empresas concessionárias.

As parcelas permanentes foram instaladas em áreas produtivas das florestas (Unidades de Produção Anual – UPAs), antes que ocorresse qualquer intervenção na área e logo após a realização do inventário 100%. A localização das parcelas permanentes e dos indivíduos arbóreos do inventário 100% foi obtida a partir de equipamento GNSS de navegação (*Global Navigation Satellite System*).

Todas as árvores com DAP  $\geq 10$  cm foram mensuradas antes da exploração e até no máximo um ano após a exploração em cada parcela permanente. Um total de 58 parcelas permanentes com formato quadrado (50 m x 50 m) e retangular, no caso da UMF III em Jamari (50 m x 100 m), foram distribuídas sistematicamente nas UPAs de cada UMF das Flonas. Para este estudo, destas 58 parcelas foram utilizadas 46 para o ajuste do modelo e 12 foram utilizadas para validação (20% no total) (Tabela 1). A validação foi feita utilizando o teste T de médias pareadas.

Tabela 1: Informações sobre as parcelas permanentes instaladas nas UPAs das UMFs das Flonas de Jamari (JAM) e de Jacundá (JAC), localizadas no Estado de Rondônia, incluindo datas dos inventários (medição e remedição), datas da exploração (início e fim) e datas do sobrevoo com LiDAR.

Flona	UMF	UPA	Parcelas	Área (ha)	Medição (Antes da exploração)	Remedição (Após a exploração)	Início exp	Fim exp	LiDAR
JAC	I	3	3	0.25	2014	2016	jun/16	ago/16	abr/17
JAC	I	4	5,6,7	0.25	2016	- *	mai/17	ago/17	abr/17
JAC	II	4	3	0.25	2015	2016	mai/16	nov/16	abr/17
JAM	I	10	4,6,7	0.25	2016	- *	mai/17	mai/17	set/15
JAM	I	11	4,5,6,8,9	0.25	2014	2016	abr/15	jun/15	set/15
JAM	I	1	3	0.25	2010	2013	set/10	ago/11	set/13
JAM	I	2	3,4,7,8	0.25	2011	2013	set/11	mai/12	out/14
JAM	I	3	4, 9	0.25	2012	2013	jul/12	set/12	out/14
JAM	I	4	1,2,3,4,5,6,8,10	0.25	2012	2014	jun/13	ago/13	set/13
JAM	I	5	9,10	0.25	2013	2015	mai/14	jun/14	set/13
JAM	I	5	1,2,3,4,5,6,7,8	0.25	2013	2015	mai/14	jun/14	out/14
JAM	I	6	5	0.25	2015	2016	ago/16	set/16	abr/17
JAM	I	6	4	0.25	2015	2016	ago/16	set/16	set/15
JAM	II	1	3,5,12	0.25	- *	2011	out/10	out/11	nov/11
JAM	III	1	1	0.50	2011	2013	out/10	ago/11	out/14
JAM	III	2	3	0.50	2011	2013	out/11	jun/13	out/14
JAM	III	3	3	0.50	2013	2014	jun/13	out/13	out/14
JAM	III	4	1,2	0.50	2014	2015	mai/14	set/14	out/14
JAM	III	5	2	0.50	2014	2016	abr/15	out/15	set/15
JAM	III	5	3	0.50	2014	2016	abr/15	out/15	out/14
JAM	III	6	1	0.50	2016	- *	abr/16	set/16	set/15

\* Não houve sobrevoo Lidar nos anos e parcelas indicados

#### 2.2.4. Obtenção de dados LiDAR

As nuvens de pontos LiDAR, em extensão \*.las, bem como o Modelo Digital do Terreno (MDT) derivado dessas nuvens de pontos, com um metro de resolução espacial, também foram disponibilizados pelo Serviço Florestal Brasileiro. Os vôos foram realizados antes e após a exploração, no entanto, foram utilizados apenas as faixas de voo correspondentes às parcelas com medições e remedições (antes e após exploração) realizadas no mesmo ano do sobrevoo (Tabela 1). O conjunto de dados (nuvens de pontos) do LiDAR foi coletado nos anos de 2011, 2013, 2014, 2015 e 2017 (Tabela 2) com sistema de projeção UTM fuso 20S e Datum SIRGAS 2000 para ambas Flonas.

As nuvens de pontos foram processadas utilizando o software FUSION (MCGAUGHEY, 2010). Estas foram normalizadas a partir do modelo digital de terreno (MDT) com o objetivo de subtrair o efeito da elevação ao nível do solo sobre a nuvem de pontos. Isto foi feito utilizando a ferramenta *ClipData*. As nuvens foram recortadas a partir do arquivo vetorial (*shapefile*), contendo a localização das parcelas permanentes, selecionando apenas as áreas referentes as parcelas de campo mapeadas. O recorte foi efetuado com a ferramenta *PolyclipCloud* e as métricas foram extraídas dos conjuntos de retornos de cada parcela amostral utilizando a ferramenta *Cloudmetrics*, responsável por extrair os parâmetros estatísticos que descrevem a nuvem de pontos das parcelas.

Tabela 2: Especificações técnicas dos voos LiDAR realizados sobre nas UMFs das Flonas de Jamari e Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia

<b>Especificações</b>	<b>Sobrevoo 2011</b>	<b>Sobrevoo 2013</b>	<b>Sobrevoo 2014</b>	<b>Sobrevoo 2015</b>	<b>Sobrevoo 2017</b>
Sensor LiDAR	LaserScan, Optech 3100	Optech, Orion	Trimble, Harrier 68i	LaserSca, Optech 3100	Optech/Gemini /04sen157
Mês da coleta	Novembro	Setembro/ Outubro	Outubro	Setembro/ Outubro	Abril
Altitude voo	850 m	850 m	500 m	700 m	700 m
Ângulo de escaneamento	11°	11°	15°	15°	15°
Sobreposição média de retornos	65%	65%	65%	70%	70%
Densidade média de retornos	25,8 ppm <sup>2</sup>	32,9 ppm <sup>2</sup>	49,6 ppm <sup>2</sup>	59,2 ppm <sup>2</sup>	30,72 ppm <sup>2</sup>

Foram feitos ajustes no arquivo vetorial das parcelas permanentes para minimizar a incerteza de suas localizações, atribuída ao erro posicional de até 20 metros do GNSS. O ajuste foi realizado a partir do cruzamento das informações do inventário 100% (*shapefile* de pontos) com o levantamento dos indivíduos identificados em cada parcela permanente (registrado em planilhas eletrônicas) e com o modelo de dossel (imagem no formato TIF) (Figura 2). As correções do arquivo vetorial de parcelas foram realizadas à medida que um ponto indicativo de um indivíduo correspondia ao mesmo indivíduo no registro de parcela permanente e à uma determinada copa no modelo de cobertura do dossel e este se encontrava no limite ou fora do polígono de parcelas permanentes.

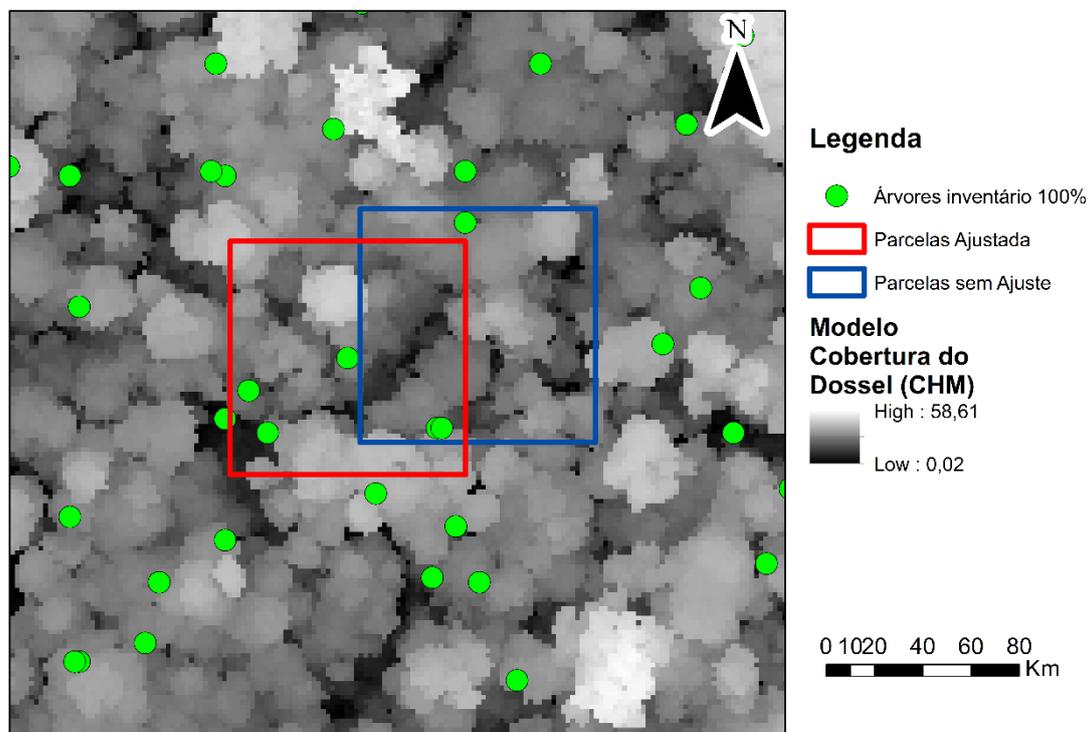


Figura 2: Imagem demonstrativa da correção do arquivo vetorial de parcelas permanentes (quadrados azul e vermelho) com base na localização das árvores do inventário 100% (pontos verdes), região da copa (regiões brancas na imagem) e dados de parcela permanente (tabela).

Os dados LiDAR utilizados para as diferentes parcelas amostradas foram as métricas de elevação (Tabela 3), por apresentarem maiores correlações com as variáveis biofísicas da floresta (MCGAUGHEY, 2010).

Tabela 3: Métricas coletadas a partir dos sobrevoos LiDAR realizados nas UMFs das Flonas de Jamari e de Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia.

<b>Categoria</b>	<b>Descrição (código)</b>
Elevação	Máxima (Elev.max)
	Mínima (Elev.mín)
	Média (Elev.mean)
	Moda (Elev.mode)
	Desvio padrão (Elev.stddev)
	Variância (Elev.variance)
	Coefficiente de variação (Elev.CV)
	Distância interquartil (Elev.IQ)
	Assimetria/obliquidade (Elev.skewness)
	Elev L1, L2, L3 e L4
	Curtose (Elev.kurtosis)
	Percentis 5°, 10°, 20°, 25°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 75°, 80°, 90°, 95°, 99°
	Elevação média quadrática (Elev.SQRT.mean.SQ)
	Elevação média cúbica ( Elev.CURT.Mean.CUBE)
Canopy.relief.ratio	

### 2.2.5. Estimativa de biomassa acima do solo (BAS)

Em cada Flona, a biomassa acima do solo (BAS) por árvore foi estimada para cada uma das parcelas permanentes amostradas nas duas ocasiões (antes e após a exploração), utilizando a equação alométrica de Chave (CHAVE et al., 2014), dada por:

$$BAS_i = \exp(-1.803 - 0.976 \times E + \ln(DM_i) + 2.673 \times \ln(DAP_i) - 0.0299 \times \ln(DAP_i^2))$$

Em que  $BAS_i$  = biomassa acima do solo, em  $Mg\ ha^{-1}$ , da árvore  $i$ ;  $DM_i$  = densidade específica da madeira, em  $g\ cm^3$ , da árvore  $i$ ;  $DAP_i$  = diâmetro a altura do peito, em cm, da árvore  $i$ ;  $E$  = Índice climático.

A densidade específica da madeira foi obtida em nível de espécie, gênero e média da parcela quando não se tinha a identificação botânica da árvore. Os dados de densidade das espécies foram obtidos a partir da biblioteca virtual de ZANNE et al. (2009), usando o package BIOMASS no software R.

O índice climático também foi obtido usando o package BIOMASS no software R, sendo calculado a partir da equação:

$$E = (0.178 \times ST - 0.938 \times DHC - 6.61 \times SP) \times 10^{-3}$$

Em que ST = Sazonalidade da temperatura, DHC = Déficit hídrico climático e SP = Sazonalidade da precipitação.

Este modelo foi escolhido, pois, para o seu ajuste foram utilizados dados de várias florestas tropicais ao longo dos trópicos resultando em boa representatividade da variação da biomassa acima do solo nas florestas. Outro ponto é a presença da variável ambiental “E” que é utilizada para estimar a variável altura, a qual normalmente não é mensurada em levantamentos de florestas tropicais devido à dificuldade e baixa precisão. Como a altura de indivíduos arbóreos está relacionado as condições climáticas, esta variável se torna importante na estimativa da biomassa visto que as características climáticas do local do estudo são inseridas no modelo a partir da inserção das coordenadas. Além do mais, este modelo é amplamente utilizado por outros estudos tanto em florestas tropicais quanto em outros tipos de florestas (CHAVE et al., 2003; PIPONIOT et al., 2018).

Após a estimativa da BAS de cada indivíduo amostrado em cada parcela, foi obtida a BAS por parcela em megagrama por hectare ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ).

#### 2.2.6. Modelagem da biomassa com dados LiDAR

Por utilizar dados de duas Flonas distintas e tamanhos diferentes de parcelas permanentes, avaliou-se a possibilidade de ajustar um modelo para ambas. Para isto foi feita ANOVA de um fator, ao nível de significância de 0,05, com a finalidade de avaliar a existência de diferença significativa na BAS entre as Flonas e entre os diferentes tamanhos de parcela.

Para realizar a modelagem da biomassa acima do solo utilizando dados LiDAR, todas as 46 parcelas utilizadas para o ajuste, contendo dados antes e após a exploração, foram submetidas à análise de correlação. Foi calculada inicialmente a correlação de Pearson ( $r$ ) entre a variável biomassa (variável resposta) estimada para cada uma das parcelas e todas as métricas obtidas a partir do LiDAR (variáveis preditoras) para as mesmas parcelas que tiveram a biomassa estimada.

Somente foram selecionadas para a modelagem, as variáveis preditoras que apresentaram correlação significativa ( $Pvalue < 0,05$ ) e superior a 0,5 ( $r > 0,5$ ) com a

biomassa. As possíveis variáveis preditoras foram submetidas aos testes de normalidade (Shapiro) e homocedasticidade (Bartlett).

Após a seleção das variáveis, com base na correlação de Pearson, foi realizado o ajuste dos modelos de biomassa utilizando método *Stepwise* de regressão, que seleciona variáveis mais significativas para o modelo. Os ajustes foram realizados pelo software Action Stat (ESTATCAMP, 2018).

Primeiramente foi testado um modelo utilizando apenas uma variável correspondente a métrica de maior correlação com a biomassa. Em seguida, as métricas sem nenhuma transformação foram submetidas primeiramente ao método *stepwise* a fim de selecionar as variáveis preditoras. A partir das variáveis selecionadas pelo *stepwise* gerou-se um primeiro modelo e em seguida foi-se retirando uma variável por vez com a finalidade de encontrar um modelo mais preciso a partir do já selecionado. Testou-se também variáveis com métricas modificadas que foram geradas tanto pela combinação de duas métricas (produto) quanto pela transformação de determinada métrica (transformação logarítmica, valor inverso, valor ao quadrado). O conjunto de métricas modificadas foram submetidos ao *stepwise* novamente. Métricas similares, como Elevação máxima e Elevação do percentil 99, também foram testadas como substitutas nos modelos gerados a partir do método *stepwise*.

O melhor modelo foi escolhido com base no gráfico de resíduos, raiz do erro médio quadrático ou erro padrão da estimativa (RMSE) e critério de Akaike (AIC).

#### 2.2.7. *Estimativa da redução da biomassa nas áreas de concessão florestal*

Após a seleção do melhor modelo alométrico para estimar a biomassa acima do solo nas áreas de concessão florestal das Flonas, foi gerado o mapa de biomassa para as três áreas da Flona de Jamari e para uma área na Flona de Jacundá. Jacundá possuía apenas dados da UMF I, por esse motivo trabalhou-se com apenas uma área desta Flona. A UMF II de Jamari não foi utilizada para a análise pois esta possuía apenas dados correspondente as medições após a exploração, não sendo possível avaliar redução da biomassa.

Desta forma, foram geradas duas imagens *raster* contendo informações de biomassa em dois momentos, antes e após a exploração com resolução espacial de um metro. As métricas utilizadas para o cálculo foram produzidas a partir dos comandos *GridMetrics* que especializa as nuvens de pontos em pixels ou *voxels* (grid regular tridimensional) e do *csv2Grid* que converte os valores dos *pixeis/voxels* em imagem (no

formato \*.asc). Para a imagem da redução da biomassa ( $Mg\ ha^{-1}$ ) foi realizado o cálculo da diferença entre as imagens antes e após exploração.

As estimativas de redução da biomassa foram obtidas a partir de quarenta (40) parcelas virtuais de 4 hectares ( $200\ m \times 200\ m$ ) que foram selecionadas e distribuídas aleatoriamente ao longo de cada UMF de cada Flona, utilizando delineamento inteiramente casualizado (Figura 3). Este tamanho de parcela foi escolhido de modo a utilizar o máximo da área disponível nas faixas de sobrevoo contendo as nuvens de pontos de onde foram extraídas as métricas e com a finalidade de captar o máximo da variação presente nos píxeis das imagens *rasters* gerados. Para esta análise foi realizada ANOVA de um fator com nível de significância igual a 0,05 para cada UMF. A análise de variância foi realizada no software R (R CORE TEAM, 2017).

Para a comparação entre Intensidade de exploração e redução da biomassa, fez-se a correlação de Pearson entre a redução da biomassa, extraídos da imagem *raster*, com os dados de árvores exploradas oriundas do inventário 100%. Também foi gerada uma regressão simples em que Y foi redução da biomassa e X foi a intensidade de exploração, representada por o número de árvores por hectare, biomassa ( $Mg/há$ ) e Volume ( $m^3/há$ ).

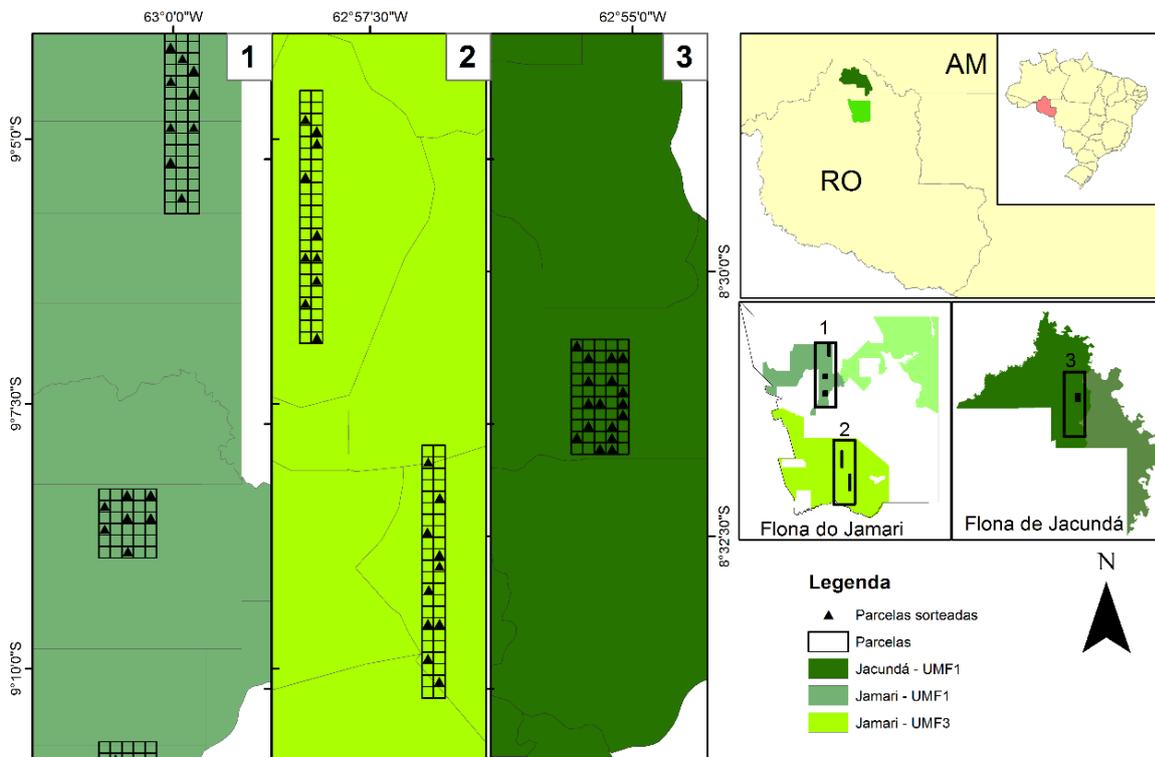


Figura 3: Grid e distribuição de parcelas para a obtenção das estimativas de estoques de biomassa e de redução de estoques de biomassa sobre a faixa de cobertura de dados LiDAR nas UMFs das Flonas de Jamari e de Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia. Parcelas com área igual a 4 hectares distribuídas nas UMFs I e III da Flona de Jamari e UMF I da Flona de Jacundá.

## 2.3.Resultados

### 2.3.1. Seleção das áreas para o ajuste do modelo

Os dados de biomassa e altura (Métrica Elev.mean) atenderam as premissas de normalidade e homocedasticidade (P-value > 0,05). Não houve diferença significativa entre as Flonas de Jacundá e Jamari, portanto, foi possível gerar um modelo que estimasse a biomassa de ambas Flonas. Também não houve diferença significativa para os diferentes tamanhos de parcela (Tabela 4).

Tabela 4: Resultados das análises de variância (ANOVA) comparando as Flonas de Jamari e de Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia, quanto ao estoque de biomassa acima do solo, antes da exploração (Mg ha<sup>-1</sup>), altura (Métrica Elev.mean) e o estoque de biomassa em função do tamanho da parcela (0,25 ha e 0,50 ha).

<b>Biomassa (Mg ha<sup>-1</sup>)</b>					
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>F value</b>	<b>P (&gt;F)</b>
<b>Flona</b>	1	11.918	11.918	1,95	0,167 n.s
<b>Resíduo</b>	70	428.010	6.114		
<b>Métrica: Elev.mean (m)</b>					
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>F value</b>	<b>P (&gt;F)</b>
<b>Flona</b>	1	18,144	18,144	1,89	0,174 n.s
<b>Resíduo</b>	70	673,1	9,616		
<b>Tamanho de Parcela (0,25 ha e 0,50 ha)</b>					
<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>F value</b>	<b>P (&gt;F)</b>
<b>Tamanho</b>	1	3.008	3.008	0,482	0,49 n.s
<b>Resíduo</b>	70	43.6921	6.242		

Em que FV = Fonte de Variação; GL = Grau de liberdade; SQ = Soma de Quadrados; QM = Quadrado médio; F value = Valor de F calculado ao nível de significância de 0,05, P (>F) = Probabilidade de significância; (\*) = significativo ao nível de 5%; (n.s) = não significativo.

### 2.3.2. Seleção das métricas

Foram selecionadas 19 métricas com correlação acima de 0,5 dentre as 38 utilizadas. Estas 19 foram selecionadas como potenciais variáveis preditoras para estimar a biomassa acima do solo (Figura 4). A maior correlação encontrada foi igual a 0,75 correspondente a métrica Elevação média quadrática (Elev.SQRT.mean.SQ). Algumas métricas apresentaram multicolinearidade. As métricas Elevação do percentil 40 (Elev.P40) e Elevação máxima (Elev.max) não apresentaram multicolinearidade.

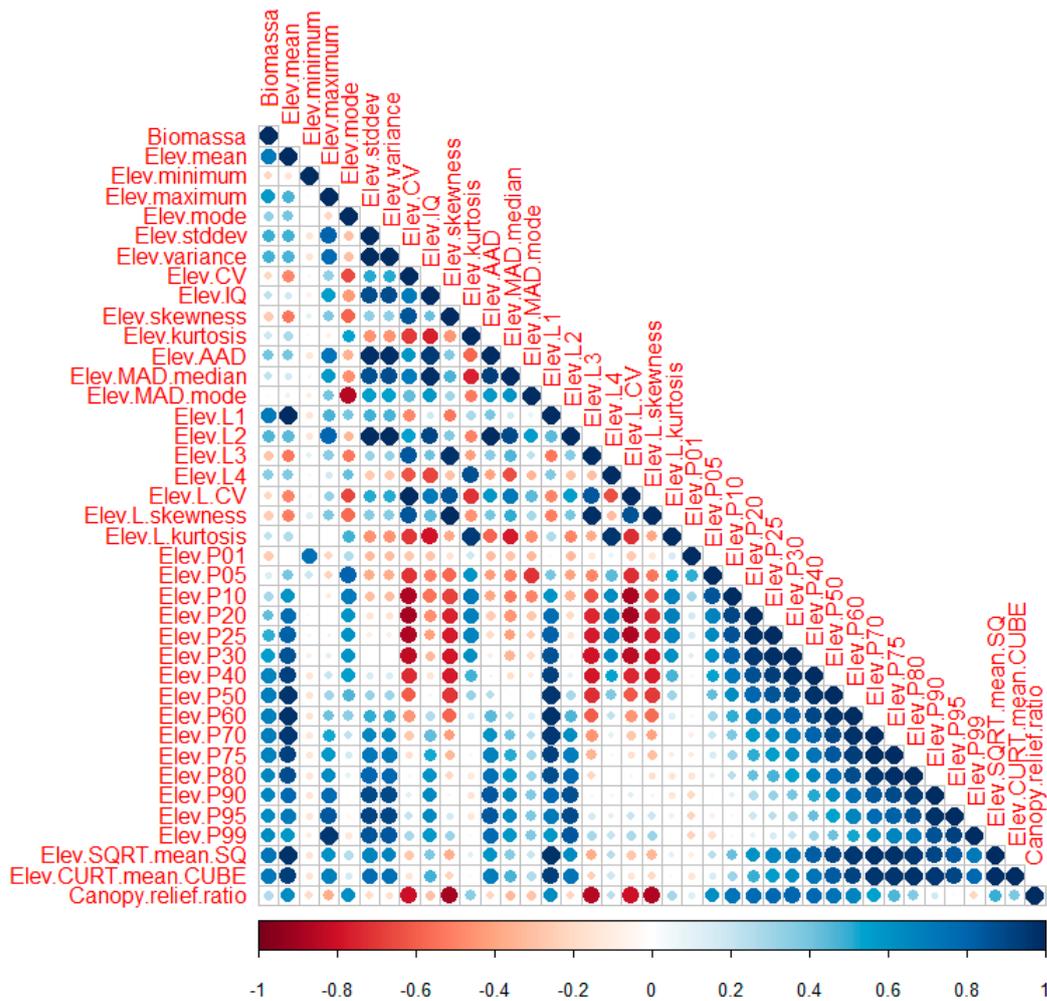


Figura 4: Representação gráfica da correlação entre as métricas dos sobrevoos LiDAR e os correspondentes estoques de biomassa acima do solo, registrados nas UMFs das Flonas de Jamari e Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia. Círculos azuis representam correlações positivas e círculos vermelhos representam correlações negativas. Tamanho do círculo indica a força da correlação. Quanto maior o círculo maior a correlação.

### 2.3.3. Seleção do modelo de biomassa gerado a partir de dados LiDAR

As 19 métricas selecionadas que foram submetidas ao ajuste *stepwise*, originaram o modelo 2 que incluiu as métricas Elevação máxima, Elevação do percentil 40, Variância da elevação e Elevação média quadrática. Apenas a métrica Elevação da Variância (Elev.variance) não foi significativa no modelo. Por este motivo as métricas/variáveis foram retiradas na tentativa de originar um modelo mais preciso (modelo 3, 4 e 5). Destes o mais preciso foi o modelo 4 o qual contém apenas as métricas Elevação máxima e Elevação do percentil 40 (Tabela 5).

Tabela 5: Modelos ajustados para estimativa da biomassa acima do solo (BAS) para as UMFs das Flonas de Jamari e Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia, incluindo as estatísticas de precisão como erro padrão da estimativa (RMSE), erro padrão da estimativa percentual (RMSE%), coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajus}$ ), índice de Akaike (AIC) e valor estatístico do teste T entre médias de duas amostras (Stat T).

Nº modelo	Modelo	RMSE	RMSE (%)	$R^2_{ajus}$	AIC	Stat T (Tcrit = 2.20098)
1	BAS = -94.1425 + 15.9929*Elev.Sqrt.mean.SQ	49.82	19.75	0.55	361.54	1.789
2	BAS = -54.6491 + 6.7217*Elev.max + 1.2561*Elev.var + 28.5907*Elev.P40 - 27.4125*Elev.Sqrt.mean.SQ	41.55	16.48	0.68	347.6	
3	BAS = -188.0918 + 7.4528*Elev.max + 14.4203*Elev.P40 - 5.3703*Elev.SQRT.mean.SQ	42.79	16.97	0.66	349.42	
4	BAS = -185.4281 + 6.0379*Elev.max + 10.8898*Elev.P40	42.75	16.95	0.67	348.41	
5	BAS = -153.8587 + 12.7534*Elev.Sqrt.mean.SQ + 3.0751*Elev.max	48.25	19.13	0.57	359.54	
6	BAS = 45.8487 + 0.2891*(Elev.max*Elev.P40)	41.99	16.65	0.68	345.81	1.778
7	BAS = -166.0582 + 4.1807*Elev.max + 12.7258*Elev.mean	46.47	18.43	0.61	356.08	
8	BAS = 35.7863 + 0.2666*(Elev.max*Elev.mean)	45.44	18.02	0.62	353.07	
9	Ln(BAS) = 3.7567 + 0.0230*Elev.max + 0.0450*Elev.P40	42.11	16.70	0.67	-159.87	
10	BAS = -1065.1243 + 162.8654*Ln(Elev.max) + 242.1806*Ln(Elev.mean)	47.54	18.85	0.59	358.17	
11	BAS = -1150.1689 + 241.4318*Ln(Elev.max) + 179.4017*Ln(Elev.P40)	43.88	17.40	0.65	350.79	
12	Ln(BAS) = 0.2440 + 0.5980*Ln(Elev.max) + 1.0281*Ln(Elev.mean)	46.10	18.28	0.61	-152.52	
<b>13</b>	<b>Ln(BAS) = -0.1118 + 0.9331*Ln(Elev.max) + 0.7576*Ln(Elev.P40)</b>	<b>41.94</b>	<b>16.63</b>	<b>0.67</b>	<b>-160.93</b>	<b>1.647</b>
14	BAS = -152.506 + 1.1984*(Elev.max*Elev.P40) - 0.0012*(Elev.max*Elev.P40) <sup>2</sup> + 5.63E-07*(Elev.max*Elev.P40) <sup>3</sup>	41.72	16.54	0.70	347.07	1.837
15	BAS = 1/(0.0784 - 0.0568*(Elev.max*Elev.P40) <sup>0.0409</sup>	42.22	16.74	0.68		
16	BAS = 115.2896*e^(0.00106*Elev.max*Elev.P40)	42.09	16.69	0.68		
17	BAS = -1083.36 + 242.96*Ln(Elev.P99) + 160.56*Ln(Elev.P40)	44.47	17.63	0.64	352.02	
18	Ln(BAS) = -0.088 + 0.958*Ln(Elev.P99) + 0.68*Ln(Elev.P40)	42.97	17.04	0.67	-160.8	
19	BAS = -163.236 + 6.437*Elev.P99 + 9.831*Elev.P40	43.76	17.35	0.65	350.53	

As variáveis compostas por métricas combinadas que foram submetidas ao *stepwise* originaram o modelo 6, que possui apenas uma variável resultante do produto entre a métrica Elevação máxima e Elevação do percentil 40. Esta variável foi testada em outras famílias de modelo originando os modelos 14, 15 e o 16.

Os modelos 7, 8, 10, 12, 17, 18 e 19 foram gerados a fim de substituir as métricas que foram selecionadas como potenciais variáveis por métricas correspondentes com alta correlação, como é o caso da Elevação máxima com Elevação do percentil 99 e Elevação do percentil 40 com Elevação média. Os modelos 9, 11, 12, 13 foram gerados a partir de transformações logarítmicas de suas variáveis. O modelo 13 se destacou dos demais por apresentar melhores estatísticas de precisão.

Todos os modelos ajustados apresentaram similaridades entre os gráficos de resíduos e os gráficos de valores observados por preditos. Por este motivo, optou-se por apresentar apenas os gráficos referentes aos modelos mais precisos: modelo 1 (modelo referência contendo apenas a métrica de maior correlação com a biomassa), modelo 2, modelo 4 (modelo com as variáveis mais significativas não multicolineares sem transformação) e modelos 6, 13 e 14. Apenas o modelo 14 (Polinomial) apresentou gráfico heterogêneo indicando alta subestimação dos valores, embora tenha apresentado o segundo menor erro padrão da estimativa (5A, 5B e 5C) (Figura 5). Apesar do modelo 2 ter apresentado o menor erro percentual, este foi penalizado pelo critério de Akaike por possuir muitas variáveis predictoras. Após comparar todos os modelos, o modelo logarítmico 13 foi selecionado, pois, além de explicar 69% da variação total da biomassa, apresenta distribuição de resíduos homogênea, menor erro padrão da estimativa (RMSE% = 41,94 Mg ha<sup>-1</sup> ou 16,6%) e baixo valor de AIC.

O modelo escolhido apresentou concentração de resíduos nas classes centrais e tendências a superestimação (4A, 4B e 4C) (Figura 4). O teste de comparação entre médias, aplicado nas parcelas de validação mostrou que não há diferença significativa entre a biomassa observada e a biomassa predita pelo modelo selecionado (Tabela 5) (Tstat < 2,2009 e P-value > 0,05), ou seja, o modelo é adequado para estimar a biomassa na região.

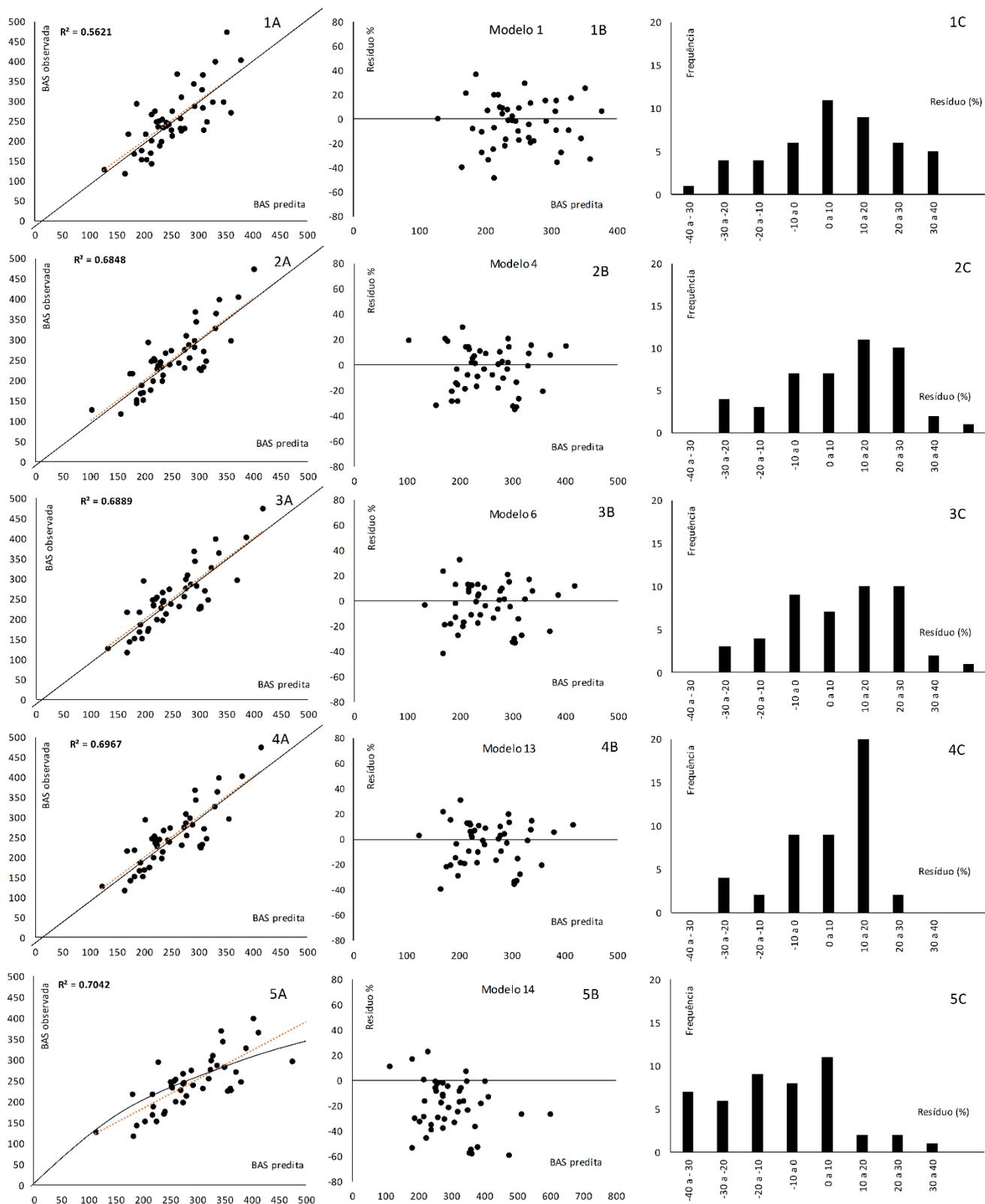


Figura 5: A – Representação gráfica da relação entre biomassa ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) observada e biomassa ( $\text{Mg há}^{-1}$ ) predita nas UMFs das Flonas de Jamari e Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia; B - Resíduos percentuais em função de biomassa ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) predita; 3 - Distribuição de frequência dos resíduos em percentagem.

#### 2.3.4. Estimativa da redução da biomassa nas áreas de concessão após exploração

Os estoques de biomassa na Flona de Jamari variaram de 242,15 Mg ha<sup>-1</sup> a 349,67 Mg ha<sup>-1</sup>. Já os estoques da Flona de Jacundá variaram de 216,38 Mg ha<sup>-1</sup> a 286,96 Mg ha<sup>-1</sup>. A Flona de Jacundá apresentou menor estoque de biomassa no período avaliado quando comparada à Flona de Jamari (Tabela 6).

Tabela 6: Valores máximos, mínimos e média do estoque de biomassa nas UMFs I e III da Flona de Jamari e UMF I na Flona de Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia.

UMF	Antes da Exploração BAS (Mg há <sup>-1</sup> )			Depois da Exploração BAS (Mg há <sup>-1</sup> )		
	Máx	Mín	Média	Máx	Mín	Média
<b>JAC1</b>	286.96	216.38	259.03±51.38	289.67	228.26	262.58±63.22
<b>JAM1</b>	316.58	242.15	284.50±53.16	304.44	222.70	267.26±49.81
<b>JAM3</b>	340.67	279.52	307.33±50.03	318.26	270.55	293.71±50.29

A Flona de Jacundá registrou cerca de 1% de redução da biomassa total após a exploração. Já a Flona de Jamari apresentou redução de aproximadamente 3% em ambas UMFs (Figura 7). Houve diferença significativa entre as quantidades médias de biomassa acima do solo estocada antes e após a exploração nas duas Flonas (Tabela 7), o que leva a deduzir que embora quantitativamente a exploração tenha afetado o estoque de biomassa nas duas Flonas, o maior efeito foi na Flona de Jamari.

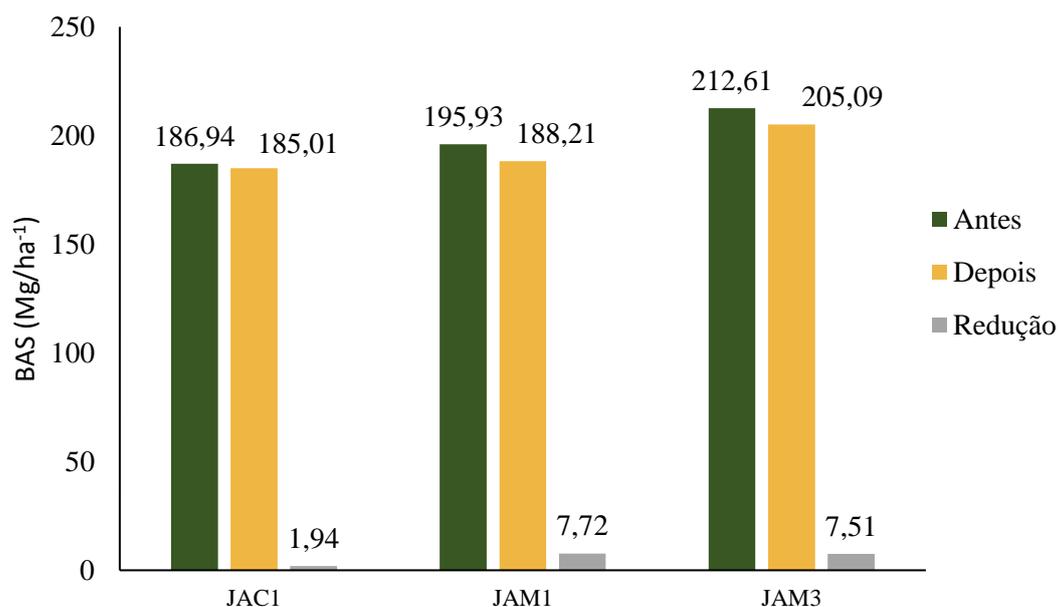


Figura 6: Valores de estoque total de biomassa acima do solo (BAS) antes da exploração (Verde escuro) e após a exploração (Laranja) e valores de redução do estoque de biomassa (Cinza), registrados nas Flonas de Jamari e Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia.

Tabela 7: Resultados das análises de variância (ANOVA) de medidas repetidas no tempo, para avaliar a influência do tempo (antes e após exploração) no estoque de biomassa (Mg ha<sup>-1</sup>) na UMF I e UMF III da Flona de Jamari e na UMF I da Flona de Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia.

UMF I da Flona de Jamari					
	GL	SQ	SQM	F value	P (>F)
<b>Tempo</b>	1	1345	1345	16,89	0,000197*
<b>Resíduo</b>	39	3106	79,6		
UMF III da Flona de Jamari					
	GL	SQ	SQM	F value	P (>F)
<b>Tempo</b>	1	399,8	399,8	5,529	0,0238*
<b>Resíduo</b>	39	2819,9	72,3		
UMF I da Flona de Jacundá					
	GL	SQ	SQM	F value	P (>F)
<b>Tempo</b>	1	514,5	514,5	9,958	0,00308 n.s
<b>Resíduo</b>	39	2015,0	51,7		

Em que FV = Fonte de Variação; GL = Grau de liberdade; SQ = Soma de Quadrados; QM = Quadrado médio; F value = Valor de F calculado ao nível de significância de 0,05, P (>F) = Probabilidade de significância; (\*) = significativo ao nível de 5%; (n.s) = não significativo.

O mapa de redução de biomassa evidencia a retirada dos indivíduos arbóreos, sendo que áreas com menor valor de biomassa (escura) estão relacionadas a clareiras e áreas com maior valor (clara) estão relacionadas com áreas que possuem vegetação, isto é, onde não foi retirado qualquer árvore (Figura 7).

O mapa de redução apresentou regiões com aumento de biomassa e redução variando de valores negativos a positivos. Os *pixels* onde a biomassa após a exploração foi maior que a biomassa antes da exploração resultaram em valores negativos, enquanto os *pixels* que registraram redução da biomassa apresentaram valores positivos.

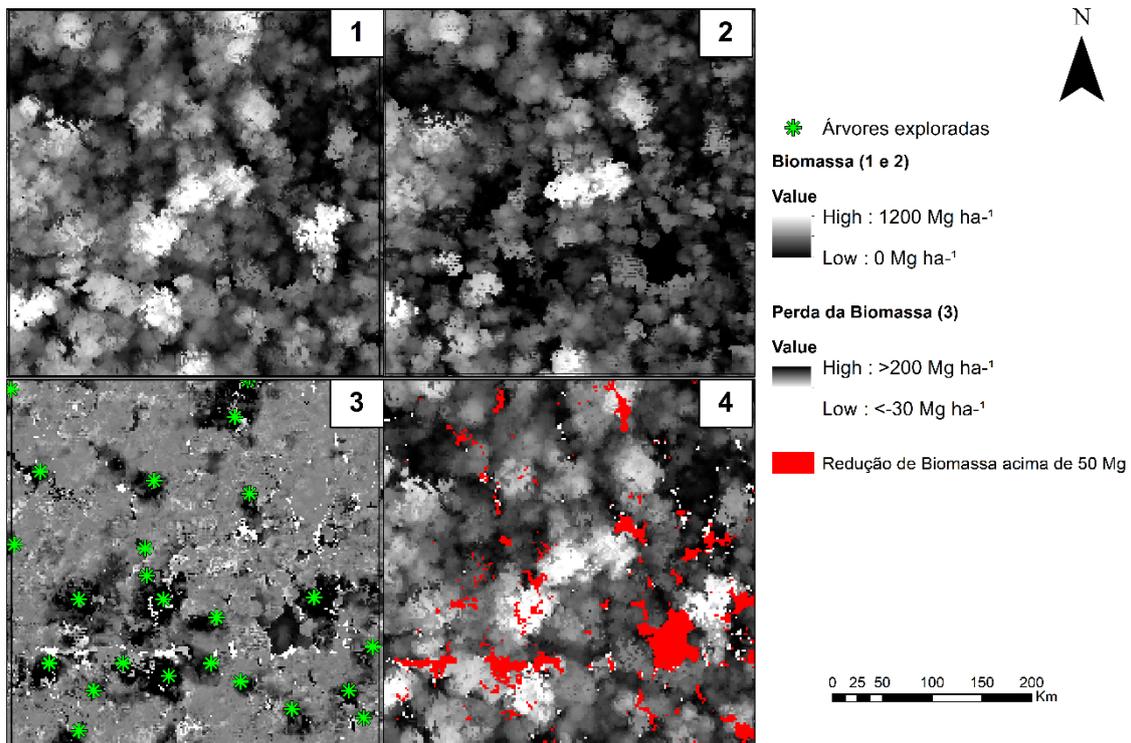


Figura 7: Mapa representando a redução da biomassa acima do solo para área de 1 m<sup>2</sup>, nas áreas das Flonas de Jamari e Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia. Mapa antes da exploração (1); Mapa após a exploração (2); Redução da biomassa, onde a imagem após a exploração foi subtraída da imagem antes da exploração (3); Destaque para áreas em que houve diminuição da biomassa (4).

A área de Jacundá referente a UPA 3, cuja intensidade média de exploração no início da exploração ( $7,65 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) foi menor que a de Jamari ( $12,79 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ), apresentou menor estoque de madeira explorado que as áreas de Jamari, tanto em termos de volume, biomassa e número de árvores por hectare. Contudo, a redução em biomassa foi pouco explicada pela intensidade de exploração (Tabela 8).

Embora baixa, existe correlação positiva e significativa entre redução de biomassa, número de árvores exploradas, volume ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) explorado e biomassa ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) explorada (Figura 9).

Tabela 8: Estimativas de volume, biomassa e número de árvores explorados nas parcelas das UMFs localizadas nas Flonas de Jamari (JAM) e Jacundá (JAC), localizadas no Estado de Rondônia.

Área	Vol ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ )	AGB ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )	Nº árv $\text{ha}^{-1}$
JAC1	27,18	46,39	4,22
JAM1	66,89	111,22	8,90
JAM3	44,87	63,88	5,73

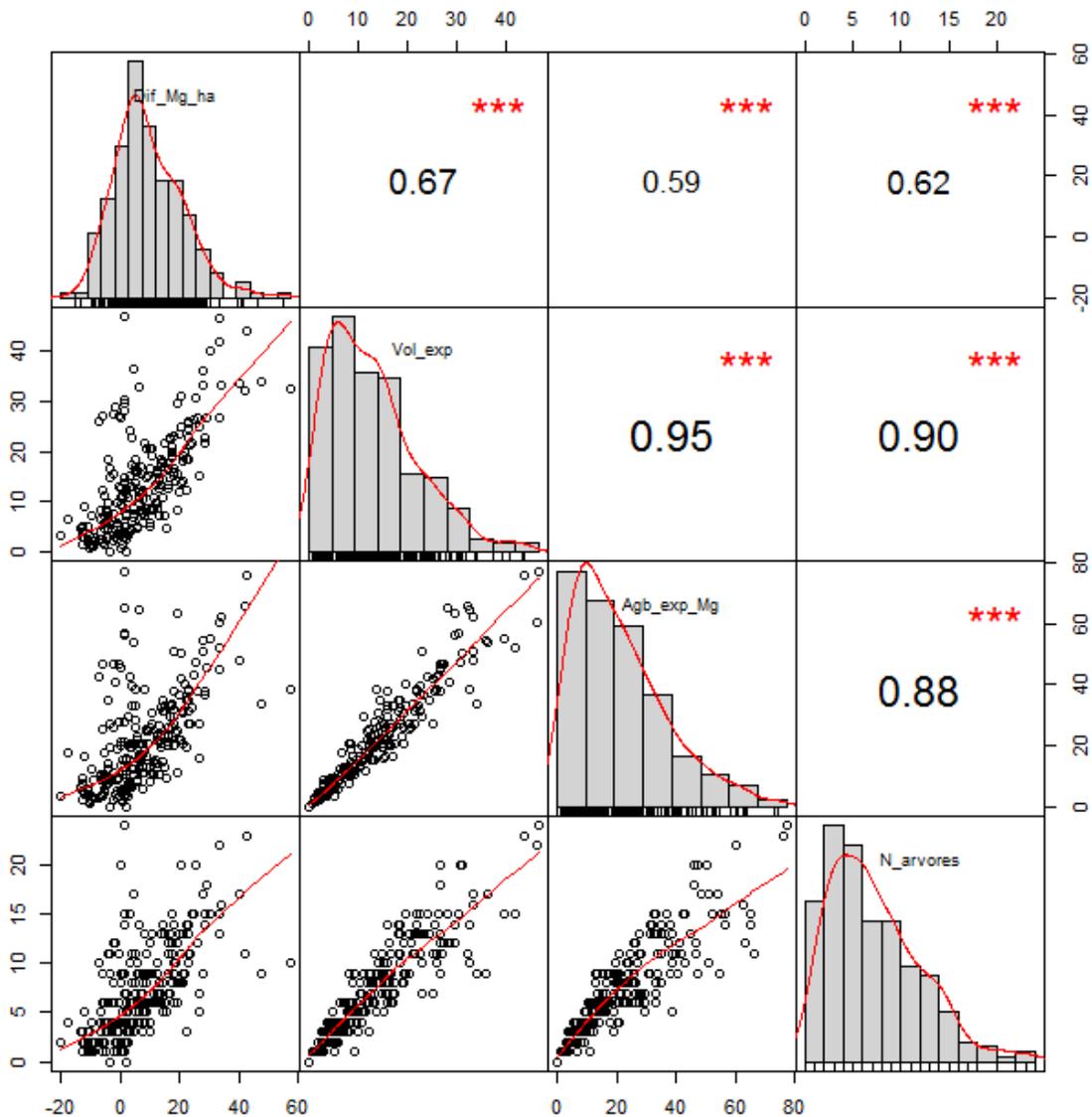


Figura 8: Correlação de Pearson indicando correlação significativa entre redução de biomassa e intensidade de exploração nas Flonas de Jamari e Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia. Agb = Biomassa, Dif\_Mg\_ha = Redução da biomassa por hectare, Vol\_exp = Volume (m<sup>3</sup>) explorado por hectare, Agb\_exp\_Mg = Biomassa explorada em tonelada por hectare, N\_arvores = Número de árvores exploradas por hectare.

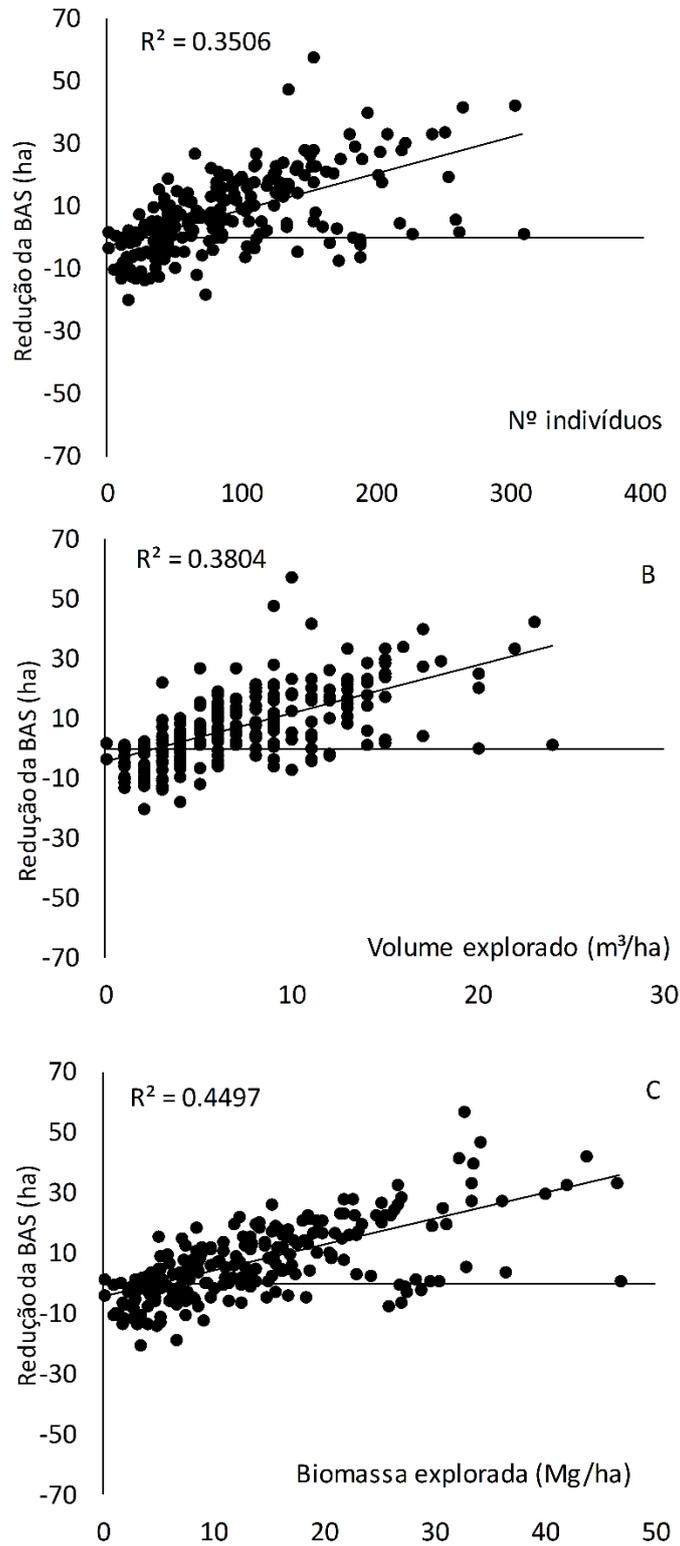


Figura 9: Redução do estoque de biomassa acima do solo nas UMFs das Flonas de Jamari e Jacundá sendo explicada por número de árvores exploradas por hectare (A), volume explorado em  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  e por estoque de biomassa explorado em  $\text{Mg ha}^{-1}$  (C). Variáveis obtidas a partir de dados LiDAR e explicada por dados de exploração do inventário 100%.

## 2.4. Discussão

### 2.4.1. Métricas do LiDAR

Em geral, muitos estudos utilizam métricas de elevação ou outro tipo de altura, como variáveis preditoras da biomassa acima do solo por estarem associadas com as coordenadas de posicionamento vertical dos pontos na nuvem, indicando a altura dos objetos na superfície (GORGENS; SILVA; RODRIGUEZ, 2014). As métricas de percentis também são utilizadas e estão relacionadas ao percentual de retornos encontrados abaixo do eixo Y. Normalmente, as métricas de percentis mais usuais são o P95 e o P90, pois, apresentam alta correlação com a altura dominante das árvores (BECKNELL et al., 2018). Neste estudo, as métricas de percentis não foram selecionadas, pois, embora a correlação destas métricas com a biomassa tenha sido significativa, houve multicolinearidade com as outras variáveis envolvidas no modelo (Figura 3).

As métricas selecionadas, Elev.maximum e Elev.P40, estão relacionadas diretamente com a altura das árvores (GORGENS; SILVA; RODRIGUEZ, 2014). A métrica Elev.maximum apresentou os maiores valores de elevação registrados, o que corresponde as árvores mais altas encontradas nas parcelas (D'OLIVEIRA; FIGUEIREDO; PAPA, 2014). O benefício de utilizar a variável Elev.maximum no modelo parte do princípio de que esta métrica não é baseada em relação ao solo, o que inibe a interferência de erros oriundos da localização do solo na estimativa de biomassa (MEYER et al., 2013).

Métricas que consideram a altura máxima são indicadoras adequadas de perda de biomassa (MEYER et al., 2013). Portanto, por se tratar de um modelo ajustado que envolve unidades amostrais exploradas e não exploradas, é admissível que a retirada de árvores de interesse comercial interfira na elevação máxima de parcelas já exploradas.

O uso da métrica de elevação máxima também foi identificado em estimativas de biomassa e volume em florestas de pinus e florestas decíduas (POPESCU; WYNNE; NELSON, 2003), em floresta tropical (SINGH et al., 2016) e em savanas, reduzindo significativamente os erros de estimativa de biomassa acima do solo (COLGAN; ASNER; SWEMMER, 2013).

A métrica Elevação do Percentil 40 (Elev.P40) está próxima a altura média das árvores na área. Métricas intermediárias a partir do percentil 25 contribuem para a estimativa de biomassa e também para estudos de índice de área foliar (D'OLIVEIRA et al., 2012; QU et al., 2018).

Deste modo, a combinação de diferentes métricas de altura favorece a descrição da biomassa em área com diferentes extratos, o que justifica o desempenho do modelo escolhido, pois, a inserção de métricas de altura intermediária em modelos de biomassa contribui na detecção de mudanças na biomassa acima do solo, já que estas são afetadas pela regeneração natural (MEYER et al., 2013) e, conseqüentemente, pela supressão de indivíduos nos extratos inferiores.

#### 2.4.2. *Modelo de biomassa ajustado*

Embora o modelo selecionado para estimar biomassa acima do solo em áreas exploradas e não exploradas das Flonas de Jamari e de Jacundá não tenha apresentado alta precisão, suas estatísticas estão dentro dos limites encontrados por outros estudos envolvendo modelagem da biomassa em florestas tropicais e subtropicais, utilizando métricas LiDAR, os quais obtiveram valores de  $R^2$  variando de 0,60 a 0,80 e valores de RMSE até 30% (GARCIA et al., 2017; LONGO et al., 2016; SHAO et al., 2018; ZHANG; CAO; SHE, 2017). Uma justificativa para as estatísticas de precisão desses modelos não serem altas pode estar relacionada com a amarração entre as parcelas de campo e a nuvem de pontos do LiDAR, pois, embora a tecnologia LiDAR possua alta precisão, problemas decorrentes da coleta de dados em campo podem gerar inconsistências durante a integração entre os dados de campo e os dados LiDAR, pela falta de uma amarração geográfica precisa (GARRASTAZU et al., 2011).

Outra justificativa pode estar relacionada com a heterogeneidade das florestas tropicais, que é um fator que também interfere na capacidade de predição da biomassa com o uso do LiDAR (D'OLIVEIRA et al., 2012; ELLIS et al., 2016).

Neste estudo específico, o modelo gerado envolveu um conjunto de dados com alta variabilidade, já que, os dados eram provenientes de Flonas distintas e com diferentes intensidades de exploração em cada UMF considerada. Essa variabilidade nos dados pode ser considerada uma vantagem para o modelo, pois, além de poder estimar valores de biomassa entre 100 Mg ha<sup>-1</sup> e 400 Mg ha<sup>-1</sup>, esse modelo é indicado para estimar a biomassa mesmo após exploração, já que foi ajustado utilizando também parcelas medidas após a exploração.

### 2.4.3. Estimativas de biomassa nas Flonas de Jamari e Jacundá

Os estoques médios de biomassa acima do solo estimados para as Flonas de Jamari e de Jacundá e suas respectivas reduções decorrentes da exploração florestal são corroborados por outros estudos que obtiveram estoques variando de 200 a 300 Mg ha<sup>-1</sup> ±19,1 Mg ha<sup>-1</sup> e reduções com a exploração variando em cerca de 6 e 8 Mg ha<sup>-1</sup> (COOMES et al., 2018; SATO et al., 2016; SHAO et al., 2018).

As parcelas virtuais de 4 ha utilizadas para avaliação da redução da biomassa obtiveram uma variedade de *pixeis* abrangendo áreas modificadas com a exploração e áreas adjacentes não modificadas. Deste modo, além da redução, também foi observado aumento de biomassa em alguns *pixeis*. Assim, as áreas que obtiveram aumento da biomassa, por estarem inseridas na amostragem, podem ter influenciado nas médias gerais de redução, o que justifica o baixo valor de redução da biomassa por hectare encontrado.

A diferença obtida na redução do estoque de biomassa entre as duas Flonas pode estar relacionada a intensidade de exploração utilizada em cada uma. Além do plano de manejo de Jacundá ter estabelecido uma intensidade de exploração máxima menor que a de Jamari, a exploração executada também foi inferior. Enquanto a área estudada de Jacundá (UPA 3) apresentou intensidade igual a 7,5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, Jamari apresentou 12,79 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

A existência de correlação significativa entre a redução da biomassa e a intensidade de exploração pode ser um indicativo dessa diferença, contudo, o baixo poder de explicação do modelo selecionado dificultou a interpretação da interferência da atividade exploratória de impacto reduzido (RIL) na área. Martin et al. (2015) também avaliaram a redução de biomassa em uma floresta tropical, e, além de não conseguirem explicar a perda de biomassa, não encontraram correlação positiva entre redução de biomassa e intensidade de exploração, o que comprova a dificuldade de detectar o efeito direto do RIL na redução da biomassa.

## **2.5. Conclusão**

Com este estudo foi possível ajustar um modelo para prever o estoque de biomassa florestal acima do solo, antes e após a exploração, à partir de uma equação linear utilizando as métricas LiDAR. A Flona de Jamari apresentou estoque médio de biomassa superior a Flona de Jacundá, contudo, a redução no seu estoque de biomassa foi maior após a exploração. Embora a capacidade de explicação tenha sido baixa, ainda assim houve correlação significativa entre a redução da biomassa e a intensidade de exploração. Deste modo, os sobrevoos LiDAR realizados sobre as áreas manejadas nas Flonas de Rondônia podem ser considerado uma boa alternativa de monitoramento na região, pois, as informações geradas pelo LiDAR resultaram em estimativas precisas de biomassa acima do solo, e permitiram detectar, a partir da quantificação da biomassa, mudanças na floresta decorrentes de exploração seletiva.

### **3. Interferência da exploração de impacto reduzido na dinâmica de carbono em floresta amazônica**

#### **Resumo**

A exploração de impacto reduzido tem sido uma importante alternativa de manejo florestal no âmbito de promover a sustentabilidade da floresta e o resgate de carbono. Portanto, acompanhar a dinâmica de carbono em florestas submetidas a exploração de impacto reduzido é necessário não apenas para avaliar a eficiência da exploração, mas, também para fornecer informações para criação de cenários climáticos e para o estabelecimento de projetos ambientais. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi comparar a dinâmica do estoque de carbono de uma floresta sob concessão florestal, localizada na Flona de Jamari, Estado de Rondônia, em duas condições: explorada e não explorada. O estudo foi realizado em uma UPA (Unidade de Produção Anual) explorada em 2011 e em duas UPAs não exploradas. Dez unidades amostrais virtuais de 100 m x 100 m selecionadas aleatoriamente em cada UPA foram monitoradas por meio de sobrevoos LiDAR, ao longo de 4 anos após a exploração da UPA (2011, 2013, 2014 e 2015). A estimativa do estoque de carbono foi obtida a partir de uma equação desenvolvida com métricas LiDAR ajustada para a área de estudo. A ANOVA de medidas repetidas foi utilizada para avaliar diferenças no estoque e incremento de carbono entre anos após a exploração e entre áreas (explorada e não explorada). O estoque de carbono na área explorada (UPA 1) foi cerca de 15% menor que o registrado nas áreas não exploradas (UPA 7 e 8). Durante o período monitorado, o incremento médio anual do estoque de carbono na área explorada foi igual a, aproximadamente, 0,91 Mg ha<sup>-1</sup>. Contudo, nas áreas não exploradas (UPAs 7 e 8) não houve incremento de carbono, mas sim redução. Nas UPAs 7 e 8, a redução foi de 1,30 Mg ha<sup>-1</sup> e 1,60 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Os resultados indicam que houve maior captação de carbono na área submetida a exploração, o que pode estar relacionado ao crescimento dos indivíduos dos estratos inferiores, em decorrência da abertura de clareiras. Comparando o incremento do estoque de carbono ao longo do tempo entre as áreas exploradas e não exploradas, não foi observada diferença significativa (*Pvalue* < 0.05), indicando que a floresta explorada por meio de técnicas de impacto reduzido manteve a sua capacidade de incremento em carbono.

**Palavras-chave:** Floresta Tropical, Incremento, LiDAR, Amazônia, Concessão Florestal.

#### **3.1. Introdução**

O cenário de mudanças climáticas globais tem despertado questionamentos e movimentado a comunidade científica nos últimos tempos e diversos estudos realizados com a finalidade de compreender as principais causas e influências das alterações climáticas, chegaram à conclusão de que as emissões de gases poluentes na atmosfera têm grande contribuição (FEARNSIDE, 1996; HEROLD; SKUTSCH, 2011).

O CO<sub>2</sub> foi considerado como um dos principais gases de efeito estufa, e, por este motivo, passou a ser usado como moeda para negociações de redução de gases poluentes (UNITED NATIONS, 2007). Algumas atividades foram apontadas como potenciais

fontes de emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, e, o desmatamento se destacou entre as maiores fontes de emissão, principalmente no Brasil (SEEG & OCF, 2016), onde os índices de perda de cobertura vegetal nativa têm sido alarmantes.

As florestas tropicais são consideradas importantes sumidouros carbono, mas, quando são degradadas, passam a atuar como fontes emissoras de CO<sub>2</sub> (NOBRE; NOBRE, 2002; RICE et al., 2004). Entre as atividades apontadas como responsáveis pela degradação das florestas tropicais e, conseqüentemente, pelo aumento das emissões de CO<sub>2</sub>, está a exploração florestal. Por isso, nas últimas décadas, algumas estratégias vêm sendo estabelecidas visando a minimização de danos oriundos da exploração, e uma dessas estratégias é a Exploração de Impacto Reduzido (UNITED NATIONS, 2007; WWF, 2009).

Portanto, monitorar as mudanças nos estoques de carbono dessas florestas é um importante mecanismo a ser utilizado para medir a influência da intensidade de exploração na redução de carbono estocado na floresta e nas emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (MARTIN et al., 2015; RIBEIRO et al., 2009; ZOLKOS; GOETZ; DUBAYAH, 2013).

Uma das maiores incertezas na estimativa de emissões de carbono está relacionada a estimativa da densidade de carbono das florestas desmatadas (HOUGHTON, 2012). Alguns estudos têm sido feitos para avaliar o comportamento da biomassa e do carbono acima do solo, diante de impactos causados pela exploração florestal e por fatores naturais (POORTER et al., 2017; VALDEZ PÉREZ et al., 2016; VAN DER SANDE et al., 2017a). Compreender a dinâmica do carbono nas florestas tropicais, exploradas e não exploradas, é importante, pois, além de permitir avaliar a influência da exploração florestal na capacidade da floresta em estocar carbono, contribui também na definição de metas de conservação e redução da degradação. Neste sentido, este estudo tem por objetivo comparar a dinâmica do estoque de carbono de uma floresta sob concessão florestal, localizada na FLONA Jamari, Estado de Rondônia, em duas condições: explorada e não explorada.

## **3.2. Metodologia**

### *3.2.1. Caracterização da Área*

A Floresta Nacional (Flona) de Jamari (Figura 10) ocupa cerca de 220 mil hectares e está localizada no Estado de Rondônia, abrangendo os municípios de Cujubim, Porto

Velho, Ariquemes e Itapuã do Oeste (Latitude: 09°00'00" a 09°30'00"S, Longitude 62°44'05" a 63°16'54"W). A região apresenta relevo aplainado nível II que se desenvolve na presença de rochas do embasamento cristalino. Os principais solos na região de estudo são: latossolo vermelho-amarelo e o podzol hidromórfico. A vegetação predominante no local é a Floresta Tropical Ombrófila Densa, com faixas de Floresta Ombrófila Aberta, podendo ocorrer palmeiras ou cipós. A floresta possui indivíduos arbóreos espaçados apresentando grupos de palmeiras e lianas lenhosas e epífitas. O sub-bosque é composto por plântulas e árvores jovens. A região apresenta clima Am – Tropical de monção (Köppen), com período seco bem definido durante o inverno entre os meses junho e agosto. O período mais chuvoso na região ocorre entre os meses de outubro a abril (IBAMA, 2005; SFB, 2017b).

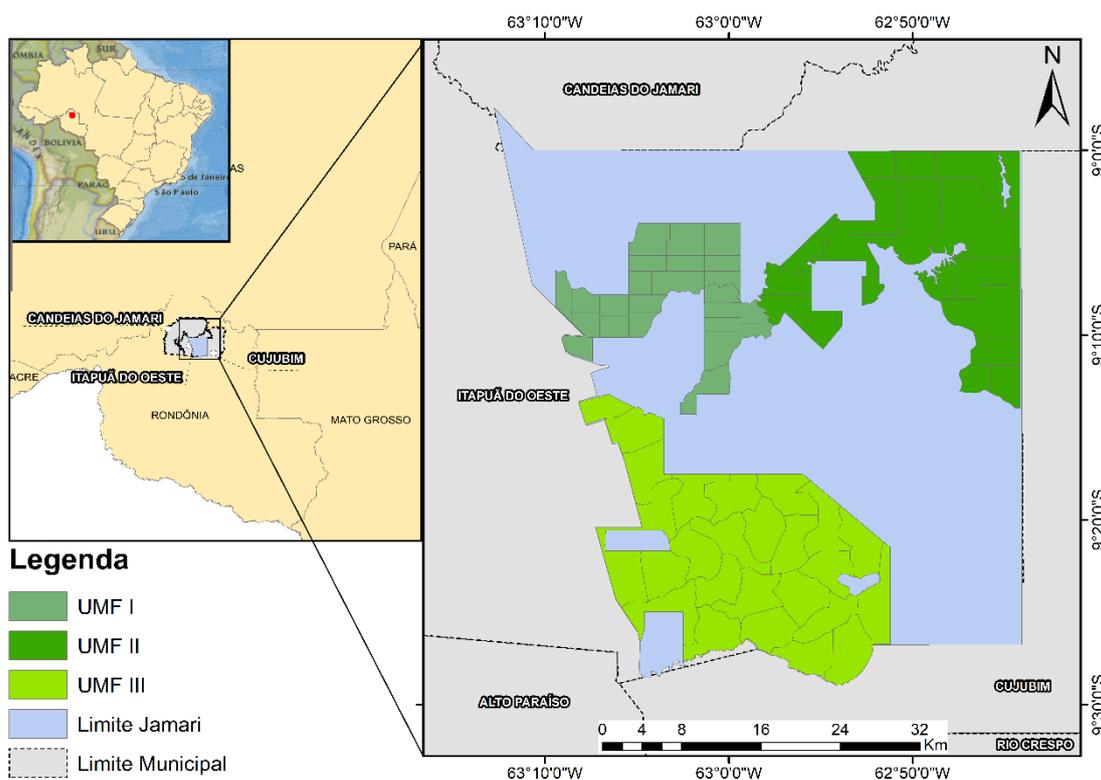


Figura 10:Localização da Floresta Nacional do Jamari, no Estado de Rondônia.

Da área total da Flona do Jamari, 96 mil hectares foram destinados a concessão florestal e o restante foi destinado a preservação ambiental ou uso de populações do local. A área de concessão foi dividida em três unidades de manejo florestal (UMF), sendo uma com 17 mil ha (UMF I) e as outras com 33 mil ha (UMF II) e 46 mil ha (UMF III). Cada UMF está subdividida em Unidades de Produção Anual (UPAs).

Este estudo foi realizado em 3 UPAs da UMF I, ou seja, na UPA 1, que foi explorada com intensidade de exploração igual a  $15,57 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  e nas UPAs 7 e 8, que não foram exploradas (Figura 11). A exploração na UPA 1 teve início no ano de 2010 e a intensidade de exploração foi definida em no máximo  $25,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (MUHLBAUER, 2017).

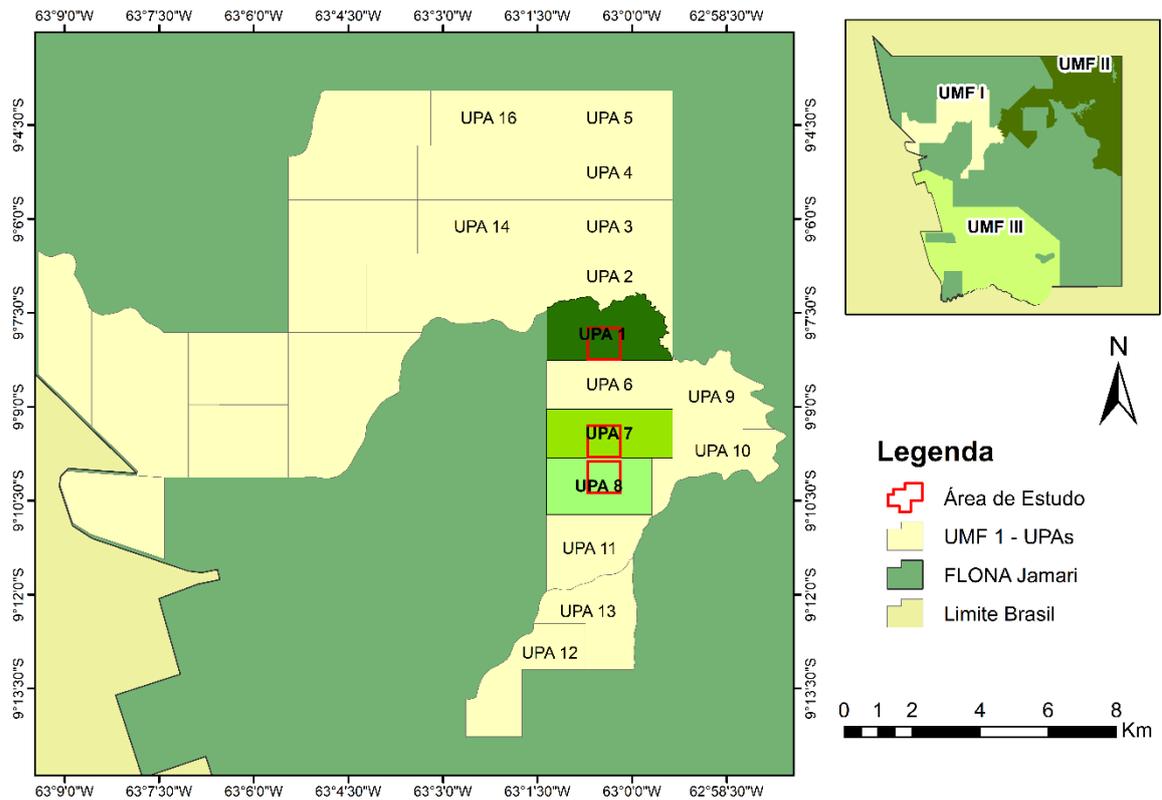


Figura 11: Área de estudo na Unidade de Manejo Florestal I (UMF I), localizada na Flona de Jamari, Estado de Rondônia. UPA1, explorada em 2010 e UPAs 7 e 8, não exploradas.

### 3.2.2. Coleta de dados

Em cada UPA da UMF I foi alocada uma parcela virtual de  $900 \text{ m} \times 900 \text{ m}$ , área referente a sobreposição de voos LiDAR em anos consecutivos. Cada parcela foi subdividida em subparcelas virtuais de  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  onde foram sorteadas 10 unidades amostrais para representar cada UPA (Figura 12). Os valores de estoque de carbono foram extraídos a partir de imagem *raster* com  $1 \text{ m}^2$  de resolução contendo valor de carbono em megagrama por hectare. Este mapa de carbono foi obtido por meio de uma equação de biomassa gerada para a região utilizando métricas LiDAR ou seja:

$$\text{BAS} = e^{-0,1118 + 0,9331 \times \text{Ln}(\text{Elev.max}) + 0,7576 \times \text{Ln}(\text{Elev.P40})}$$

em que BAS é o valor estimado da biomassa acima do solo na subparcela  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), em  $\text{Mg ha}^{-1}$  ( $\text{RMSE} = 41,94$  e  $R^2_{aj} = 0,67$ ); Elev.max é o valor obtido pelo LiDAR da métrica de elevação máxima da subparcela  $i$ , em metros; Elev.P40 é o valor obtido pelo LiDAR da métrica de elevação do percentil 40 na subparcela  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), em metros.

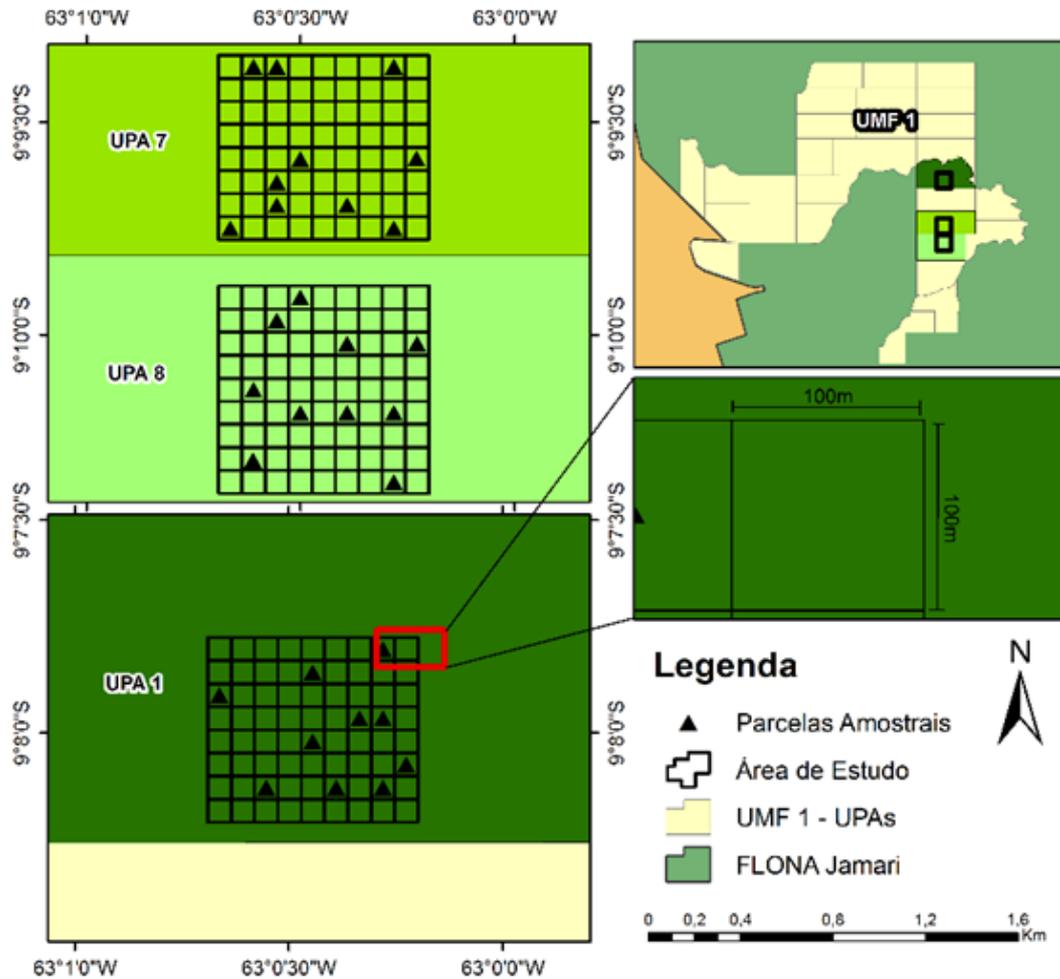


Figura 13: Croqui das unidades amostrais de 100 m x 100 m selecionadas aleatoriamente e mensuradas em cada UPA amostrada na UMF I

O estoque de carbono de cada parcela amostrada foi obtido a partir do produto entre a equação que estima a biomassa seca acima do solo (BAS) e o fator 0,5, considerando que, por definição, a quantidade de carbono na madeira é igual a 50% da sua biomassa seca (PENMAN et al., 2003). Além disso, estudos realizados na Floresta

Amazônica indicam que, em geral, 50% do peso seco de uma árvore correspondem ao carbono estocado (HIGUCHI; CARVALHO Jr, 1994; HOUGHTON et al., 2000).

Portanto, a equação utilizada para estimar o estoque de carbono da biomassa arbórea acima do solo nas parcelas amostradas em cada UPA foi:

$$CAS = e^{-0,1118 + 0,9331 \times \text{Ln}(\text{Elev.max}) + 0,7576 \times \text{Ln}(\text{Elev.P40})} \cdot 0,5$$

em que CAS é o valor estimado do estoque de carbono presente na biomassa acima do solo da subparcela  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), em  $\text{Mg ha}^{-1}$ ; 0,5 é o teor médio de carbono na biomassa seca (madeira).

O software FUSION foi utilizado para extração das métricas Elev.max e Elev.P40 por meio dos comandos *GridMetrics*, que espacializa as nuvens de ponto em pixels ou *voxels* (grid regular tridimensional) e do *csv2Grid* que converte os valores dos *pixels/voxels* em imagem (no formato \*.asc) (MCGAUGHEY, 2010). As métricas foram extraídas a partir dos dados de nuvens LiDAR, monitorados por 4 anos, ou seja, em 2011, 2013, 2014 e 2015, que correspondem aos anos que tiveram sobrevoo nas áreas (Tabela 9). O primeiro sobrevoo ocorreu em 2011, um mês após a exploração da UPA 1. O intervalo de tempo entre cada sobrevoo foi de aproximadamente 12 meses, com exceção do primeiro intervalo que foi de 24 meses, pois, não houve sobrevoo em 2012 (Tabela 10).

Tabela 9: Especificações técnicas dos voos LiDAR realizados sobre nas UMFs da Flona de Jamari e Jacundá, localizadas no Estado de Rondônia.

<b>Especificações Técnicas</b>	<b>Sobrevoo 2011</b>	<b>Sobrevoo 2013</b>	<b>Sobrevoo 2014</b>	<b>Sobrevoo 2015</b>
Sensor LiDAR	LaserScan, Optech 3100	Optech, Orion	Trimble, Harrier 68i	LaserScan, Optech 3100
Mês da coleta	Novembro	Setembro/ Outubro	Outubro	Setembro/ Outubro
Altitude voo	850 m	850 m	500 m	700 m
Ângulo de escaneamento	11°	11°	15°	15°
Sobreposição média de retornos	65%	65%	65%	70%
Densidade média de retornos	25,8 ppm <sup>2</sup>	32,9 ppm <sup>2</sup>	49,6 ppm <sup>2</sup>	59,2 ppm <sup>2</sup>

Tabela 10: Datas de sobrevoos LiDAR nas UPAs 1, 7 e 8 da UMF I da Flona de Jamari, no Estado de Rondônia.

UPA	Início da exploração	Fim da exploração	LiDAR 1	LiDAR 2	LiDAR 3	LiDAR 4
1	09/2010	08/2011	nov/11	set/13	out/14	set/15
7	-	-	nov/11	set/13	out/14	set/15
8	-	-	nov/11	set/13	out/14	set/15

O incremento anual em carbono estocado ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) em cada parcela foi obtido a partir da diferença entre o estoque de carbono no ano  $i+1$  e o estoque de carbono no ano  $i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$  anos), dividido pelo número de anos.

### 3.2.3. Análise dos dados

Para verificar se a exploração florestal interfere, ao longo do tempo, na quantidade de carbono estocada na biomassa acima do solo da floresta e, para verificar também se, ao longo do tempo, o incremento em carbono estocado na biomassa florestal, acima do solo, da floresta explorada difere estatisticamente daquele registrado na floresta não explorada, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) de medidas repetidas.

O termo medidas repetidas é usado para designar medidas de uma mesma variável resposta numa mesma unidade experimental em mais de uma ocasião. A principal vantagem de aplicar a estrutura de medidas repetidas se deve a boa precisão encontrada na comparação de tratamentos, pois, todas as fontes de variabilidade entre sujeitos são excluídas do erro experimental (DIGGLE, 1988; CROWDER; HAND, 1990).

A ANOVA de medidas repetidas testa a existência de diferenças significativas entre as médias da variável resposta na população relacionada. A hipótese nula ( $H_0$ ) afirma que as médias são iguais, ou seja:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$$

Onde  $\mu$  = média da população e  $k$  = número de grupos relacionados.

A hipótese alternativa ( $H_A$ ) afirma que as médias relacionadas não são iguais (pelo menos uma média é diferente de outra média), ou seja:

$$H_A: \text{pelo menos duas médias são significativamente diferentes}$$

Antes de realizar a ANOVA de medidas repetidas, os dados foram avaliados quanto a normalidade (Teste de Shapiro Wilk) e homocedasticidade (Teste de Bartlett). Todas as análises foram realizadas no software R de estatística (R CORE TEAM, 2017). O estoque de carbono e o incremento de carbono foram as variáveis respostas. Área (explorada e não explorada) e tempo (anos após exploração) foram os tratamentos utilizados na análise. No total, foram considerados 20 repetições para cada tratamento (explorada e não explorada e anos). Foi avaliada a interferência do tempo no estoque e no incremento de carbono, bem como a condição de exploração na área (com exploração e sem exploração).

### 3.3. Resultados

Em média, o estoque de carbono na biomassa arbórea acima do solo estimado para o ano 2011 na UMF I da Flona de Jamari, com base nas parcelas virtuais, foi igual a  $82,39 \pm 7,69 \text{ Mg ha}^{-1}$  na UPA 1,  $103,98 \pm 13,07 \text{ Mg ha}^{-1}$  na UPA 7 e  $115 \pm 13,84 \text{ Mg ha}^{-1}$  na UPA 8. Estes estoques referem-se ao monitoramento realizado nas unidades amostrais, dois meses após a exploração na UPA 1. Considerando os 4 (quatro) monitoramentos realizados após a exploração na UPA 1, a quantidade de carbono estocada na biomassa arbórea acima do solo variou de  $61 \text{ Mg ha}^{-1}$  até  $95 \text{ Mg ha}^{-1}$  na UPA 1, enquanto nas UPAs 7 e 8, não exploradas, os estoques variaram, respectivamente, de  $87 \text{ Mg ha}^{-1}$  a  $134 \text{ Mg ha}^{-1}$  e  $95 \text{ Mg ha}^{-1}$  a  $133 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Tabela 11).

Ao longo do tempo monitorado (2011 a 2015), o incremento médio do estoque de carbono foi positivo e igual a, aproximadamente,  $0,91 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  na UPA 1, explorada em 2011. Nas UPAs 7 e 8, que não foram exploradas, não houve incremento de carbono, mas, sim redução nos estoques de um ano para o outro, já que os valores de incremento foram negativos, isto é,  $-1,30 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e  $-1,60 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , respectivamente. Portanto, os valores de incremento em carbono registrados nas UPAs amostradas na UMF I indicam que na área submetida a exploração houve maior captação de carbono pela vegetação, ao passo que nas áreas não exploradas, houve perda de carbono.

Após a exploração foi observada diferença significativa (P-value < 0,05) entre as médias dos estoques de carbono das UPAs 1 e 7 e das UPAs 1 e 8 (Tabela 12). A UPA 1 apresentou, em média, menor quantidade de carbono estocado por unidade de área quando comparada com as UPAs 7 e 8 (Figura 13A).

Tabela 11: Valores médio, mínimo e máximo de estoque de carbono e respectivos incrementos, estimados na UPA 1 (explorada em 2011) e nas UPAs 7 e 8 (não exploradas), localizadas na UMF I da Flona de Jamari, no Estado de Rondônia.

UPA	Ano	Quantidade total de carbono estocado (Mg ha <sup>-1</sup> )			Incremento do estoque de carbono (Mg ha <sup>-1</sup> )		
		Média ± s	Min	Max	Média ± s	Min	Max
<b>1 – Exp</b>		82,39±7,69	65,58	93,19	-	-	-
<b>7 - Não exp</b>	2011	115,67±13,84	89,08	134,39	-	-	-
<b>8 - Não exp</b>		103,98±13,07	96,03	132,74	-	-	-
<b>1 – Exp</b>		81,94±8,85	61,55	93,10	-0,25	-3,70	2,70
<b>7 - Não exp</b>	2013	114,41±14,23	88,30	133,63	-0,72	-4,66	3,16
<b>8 - Não exp</b>		103,28±12,18	97,22	131,95	-0,39	-3,99	3,06
<b>1 – Exp</b>		82,04±8,68	62,35	93,12	0,09	-3,04	2,12
<b>7 - Não exp</b>	2014	113,42±14,74	87,08	132,67	-0,91	-6,22	2,96
<b>8 - Não exp</b>		101,48±12,71	95,97	133,68	-1,66	-4,87	1,04
<b>1 – Exp</b>		84,62±8,44	65,75	95,57	2,82	1,17	3,92
<b>7 - Não exp</b>	2015	114,82±14,06	87,92	134,90	1,52	-1,53	5,89
<b>8 - Não exp</b>		102,36±12,94	97,51	132,98	0,95	-1,87	3,935

Onde: 1 – Exp = UPA 1 explorada; 7 Não Exp = UPA 7 não explorada; 8 Não Exp = UPA 8 não explorada; s = desvio padrão.

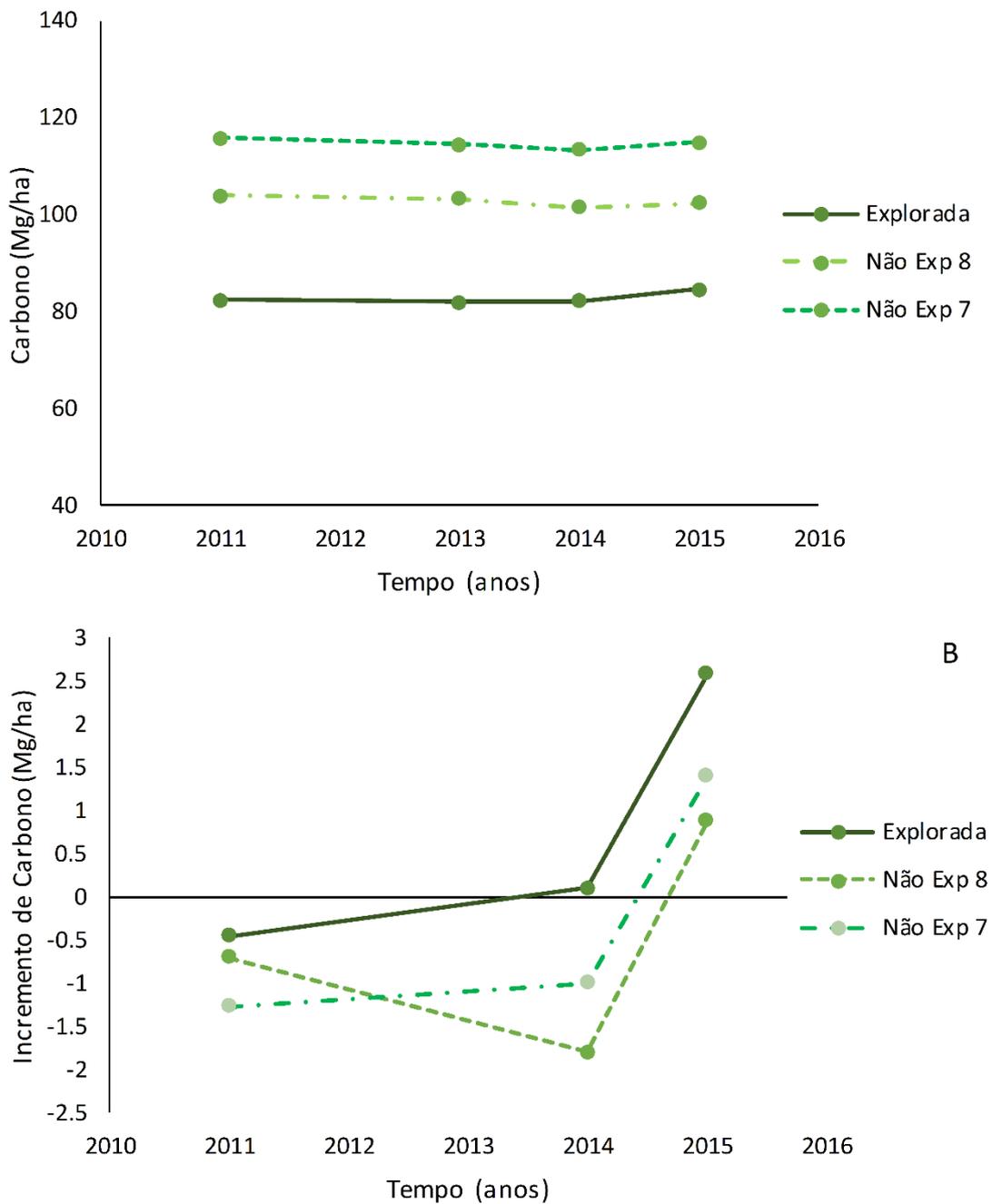


Figura 13: Estoque de carbono por unidade de área, obtido ao longo dos anos nas UPAs 1, 7 e 8 da UMF 1 da Flona de Jamari, localizada no Estado de Rondônia, indicando a diferença entre a área explorada (UPA 1) e as áreas não exploradas (UPAs 7 e 8) (A) e, a diferença na dinâmica de incremento de carbono entre os anos e entre as UPAs (B).

Comparando os estoques de carbono de cada UPA ao longo dos anos monitorados, foi observado que o estoque de carbono nas UPAs 1 e 7 se manteve praticamente constante, não sendo, portanto, influenciado pelo tempo ( $P$  value = 0,286). No entanto, houve diferença significativa ( $P$  value < 2E-16) entre os estoques de carbono das duas áreas ao longo do tempo (Tabela 12).

Tabela 12: Resultado da análise de variância (ANOVA) de medidas repetidas, comparando quantidade total de carbono estocado e incremento dos estoques de carbono nas UPAs explorada e não exploradas da UMF I, da Flona Jamari, localizada no Estado de Rondônia.

QUANTIDADE TOTAL DE CARBONO ESTOCADO (Mg ha <sup>-1</sup> )					
UPA Explorada 1 e Não explorada 7					
FONTE DE VARIACÃO	GL	SQ	SQM	F value	P (>F)
Carbono : Área	1	1411,20	1411,20	65,38	2,1e-07*
Resíduo	18	388,50	21,60		
Carbono : Ano	3	80,00	26,50	1,29	0,286 n.s
Carbono : Área : Ano	3	4302,00	1434,20	70,05	<2e-16*
Resíduo	54	1106,00	20,50		
UPA Explorada 1 e Não explorada 8					
FONTE DE VARIACÃO	GL	SQ	SQM	F value	P (>F)
Carbono : Área	1	10,94	10,943	16,4	0,000752*
Resíduo	18	12,01	0,667		
Carbono : Ano	3	5,511	1,837	6,292	0,000969*
Carbono : Área : Ano	3	16,763	5,588	19,137	1,4e-08*
Resíduo	54	15,768	0,292		
INCREMENTO DE CARBONO ESTOCADO (Mg ha <sup>-1</sup> )					
UPA Explorada 1 e Não explorada 7					
FONTE DE VARIACÃO	GL	SQ	SQM	F value	P (>F)
Carbono : Área	1	12,78	12,776	7,358	0,0143*
Resíduo	18	31,25	1,736		
Carbono : Ano	2	92,11	46,05	8,595	0,000888*
Carbono : Área : Ano	2	1,76	0,88	0,165	0,848889 n.s
Resíduo	36	192,90	5,36		
UPA Explorada 1 e Não explorada 8					
FONTE DE VARIACÃO	GL	SQ	SQM	F value	P (>F)
Carbono : Área	1	23,62	23,615	7,476	0,0136*
Resíduo	18	56,86	3,159		
Carbono : Ano	2	81,84	40,92	11,68	0,000123*
Carbono : Área : Ano	2	9,32	4,66	1,33	0,277051 n.s
Resíduo	36	126,12	3,50		
UPA Não explorada 7 e Não explorada 8					
FONTE DE VARIACÃO	GL	SQ	SQM	F value	P (>F)
Carbono : Área	1	0,97	0,971	0,137	0,716*
Resíduo	18	127,99	7,111		
Carbono : Ano	2	44,9	44,87	4,211	0,0471*
Carbono : Área : Ano	2	3,0	2,99	0,281	0,5991 n.s
Resíduo	36	404,9	10,66		

Em que FV = Fonte de Variação; GL = Grau de liberdade; SQ = Soma de Quadrados; QM = Quadrado médio; F value = Valor de F calculado ao nível de significância de 0,05, P (>F) = Probabilidade de significância; (\*) = significativo ao nível de 5%; (n.s) = não significativo.

Comparando os estoques de carbono da UPA 1 com a UPA 8, foi observada diferença significativa ( $P\text{ value} < 0,001$ ) entre tais estoques ao longo dos anos, indicando a influência do tempo avaliado no estoque de carbono. As duas áreas também se diferiram ( $P\text{value} < 0,001$ ) em relação ao efeito da interação entre presença de exploração e tempo sobre o estoque de carbono, indicando que a retirada de madeira influenciou no estoque de carbono ao longo do tempo, embora, essa diferença possa estar mais relacionada com a redução na quantidade de carbono que a UPA 8 (não explorada) teve entre 2013 e 2014 (Figura 12).

Os resultados da análise de variância (Tabela 12) indicam que existem diferenças significativas entre o incremento de carbono nas áreas e no tempo, entretanto, não houve diferença significativa na interação entre áreas e anos. Sendo assim, a hipótese de igualdade no incremento que é testada para o fator entre áreas, ou fator da parcela, foi rejeitada pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade, o que indica que a presença da exploração interferiu no incremento de carbono.

A hipótese de igualdade no incremento entre anos também foi rejeitada pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade, indicando que a evolução do tempo (2011 a 2015) interferiu no incremento de carbono, tanto na UPA 1 (explorada) quanto nas UPAs 7 e 8 (não exploradas).

Já a avaliação da interação entre áreas e anos não foi significativa para as áreas, o que mostra que a interação entre presença de exploração e tempo, não age de forma dependente sobre o incremento de carbono, ou seja, a área explorada mantém a sua capacidade de incremento em carbono e se comporta da mesma maneira que uma área não explorada.

O incremento de carbono foi semelhante para as áreas, com tendências de aumento ao longo dos anos. Embora a UPA 1 (explorada) e a UPA 7 (não explorada) apresentem tendências ao resgate de carbono e a UPA 8 (não explorada) indique a perda de carbono no intervalo entre 2013 e 2014, a diferença do incremento de carbono entre as áreas manteve sua proporção (Figura 13 B, Tabela 11). Entretanto, há diferença no incremento de carbono entre os anos, indicando capacidade de resgate distinta ao longo do tempo (Tabela 12).

As três UPAs apresentaram padrões de comportamento semelhantes em ambas as análises. Apenas a UPA 8 (não explorada) divergiu das demais por não apresentar o mesmo padrão de ganho de carbono no intervalo entre 2013 e 2014. No entanto, ainda assim apresentou o mesmo comportamento que a UPA 7 (não explorada) (Tabela 11). No

geral, ambas as áreas mantiveram o ritmo de incremento nos dois primeiros períodos, aumentando no último ano (Figura 12).

### **3.4. Discussão**

#### *3.4.1. Estoque de Carbono*

Os valores encontrados para estoque de carbono nas UPAs amostradas na Flona de Jamari são relativamente similares aos encontrados por outros estudos realizados em florestas tropicais. Estoques de carbono variando de 116 Mg ha<sup>-1</sup> a 210 Mg ha<sup>-1</sup> foram encontrados em áreas amostradas na Floresta Amazônica (CHAVE et al., 2003; JOHNSON et al., 2016; MAZZEI et al., 2010). As diferenças nas quantidades de carbono estocado estão relacionadas a localização das áreas, já que a produção de uma floresta é influenciada pelo relevo, tipo de solo e clima (AMISSAH et al., 2018).

A diferença no estoque de carbono entre a UPA explorada e as UPAs não exploradas está relacionada com a retirada de árvores e também com a instalação de infraestrutura para a exploração (MARTIN et al., 2015; MAZZEI et al., 2010). Normalmente áreas exploradas apresentam estoques menores, entretanto, áreas que utilizam exploração de impacto reduzido apresentam comportamento ao longo do tempo semelhante ao encontrado em florestas intactas (LONGO et al., 2016).

#### *3.4.2. Incremento e Dinâmica*

O incremento em carbono observado para a floresta explorada equivaleu ao dobro do incremento na floresta não explorada no intervalo de 2014 e 2015. O valor aproximado de 2,82 Mg ha<sup>-1</sup> para a área explorada (UPA 1) e de 1,52 e 0,95 Mg ha<sup>-1</sup> para as áreas não exploradas (UPAs 7 e 8) corroboram com estudo realizado em floresta explorada no Pará, utilizando o mesmo período de observação após exploração, ou seja, 4 (quatro) anos (MAZZEI et al., 2010). Também foi observado um decréscimo do estoque de carbono nas florestas não exploradas, sugerindo mortalidade, enquanto a floresta explorada apresentava incremento.

Houve diferenças nas quantidades de carbono ao longo do tempo entre UPA 1 explorada e UPA 7 não explorada (P value < 2E-16) e UPA 1 explorada e UPA 8 não explorada (P value < 1,4E-08), no entanto, isto é atribuído à redução na quantidade de carbono após a exploração. Entretanto, a dinâmica do incremento do estoque de carbono da área explorada e das áreas não exploradas foi a mesma, pois, não diferiram

significativamente uma das outras. Isto mostra que a área explorada pelo método de impacto reduzido não perdeu a sua capacidade de resgate de carbono e possuiu comportamento semelhante no sequestro de carbono. Entretanto, é necessário ressaltar que não foi calculado a emissão de carbono que ocorre através dos processos de exploração e dos resíduos deixados na floresta e na serraria. Logo, não é possível, em termos de balanço de carbono, afirmar que o comportamento das duas florestas também é semelhante.

Embora os valores de incremento foram baixos, é preciso considerar que há uma diversidade de processos que ocorrem no interior das florestas. Recrutamento e mortalidade influenciam diretamente nas quantidades de carbono e biomassa estocadas (MAZZEI et al., 2010; VAN DER SANDE et al., 2017b). Valores médios de incremento quando estudados a partir de um valor geral sem considerar a dinâmica interna presente, pouco inferem sobre esses processos, porém possibilitam a ideia de que a produção e resgate de carbono são superiores às perdas. Os ganhos numericamente parecem pequenos, no entanto, as perdas suprimem parte destes ganhos (ESPÍRITO-SANTO et al., 2014; RICE et al., 2004).

A diferença no incremento, ao longo do tempo, registrada entre as UPAs não exploradas (Figura 12), demonstra a dinamicidade existente nas florestas tropicais, onde pode existir tanto armazenamento de carbono quanto perda (RICE et al., 2004). Esse é um comportamento natural, pois, ocorre mortalidade e abertura de clareiras naturais, e também ocorre emergência de novos indivíduos presentes nos estratos inferiores da floresta (VAN DER SANDE et al., 2017b).

Avaliar o estoque e a dinâmica de carbono comparativamente em áreas exploradas e não exploradas permite identificar o quão a atividade exploratória altera a estrutura e a dinâmica de florestas intactas. Entretanto, outros serviços ecossistêmicos prestados pelas florestas e informações biológicas como abundância, composição e diversidade de espécies não são inferidos a partir da quantificação do carbono (EDWARDS et al., 2014; FERREIRA et al., 2018). Deste modo, estudos de estoque de carbono em florestas recém exploradas são importantes para avaliar o comportamento da floresta após distúrbio e sua interferência nas emissões de gases de efeito estufa. Assim, é possível avaliar se houve redução no seu papel como reguladora de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Entretanto, outros serviços ecossistêmicos são prestados e ainda não podem ser calculados a partir dos estoques de carbono. Por esse motivo é importante que além de avaliar o estoque de carbono, se avalie

também a biodiversidade, a capacidade de regeneração, o banco de sementes, a interação fauna e flora, além de outros indicadores.

### **3.5. Conclusão**

Este estudo contribuiu na avaliação do comportamento da Flona de Jamari após exploração seletiva de baixo impacto no período entre 2011 e 2015. Observou-se diferença significativa entre os estoques de carbono da área explorada (UPA 1) e das não exploradas (UPAs 7 e 8), confirmando que houve menor estoque de carbono na área explorada. Embora isto, as áreas não se diferiram significativamente quanto ao incremento de carbono, sugerindo que a área explorada (UPA 1) manteve a sua capacidade de resgate de carbono, pois ambas as áreas mantiveram o mesmo comportamento ao longo do tempo no período avaliado. Todavia é necessário ressaltar que para este estudo não foi considerado o carbono emitido pelos processos da exploração florestais e resíduos deixados na floresta, o que não permite descrever o efeito da exploração seletiva de baixo impacto sob a floresta de Jamari em sua totalidade. Nesse sentido sugere-se que para uma análise mais robusta do efeito da RIL sobre as florestas seja considerando não somente o incremento e estoque em carbono, mas também a estimativa de emissões de carbono através dos processos da exploração florestal.

## 4. Considerações finais: Revisitando as questões de pesquisa

4.1.1. *É possível estimar estoques de biomassa antes e após a exploração nas áreas submetidas a concessão florestal em Rondônia utilizando apenas métricas do LiDAR?*

A partir da combinação entre métricas LiDAR e informações de parcelas permanentes foi possível desenvolver uma equação capaz de estimar carbono e biomassa antes e após exploração ( $R^2_{aj} = 0,67$ ;  $RMSE = 41,94 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) para as duas Flonas de Rondônia, Jamari e Jacundá. O melhor modelo foi o “ $\text{Ln}(\text{BAS}) = -0,1118 + 0,9331 * \text{Ln}(\text{Elev.max}) + 0,7576 * \text{Ln}(\text{Elev.P40})$ ”, sendo BAS = biomassa em tonelada por hectare, Elev.max = Elevação máxima em metros e Elev.P40 = Percentil 40 da altura em metros.

4.1.2. *A aplicação do sistema de exploração de impacto reduzido nas Flonas de Rondônia diminui a quantidade de Biomassa total acima do solo nas áreas manejadas? A intensidade de exploração executada teve relação com a redução da biomassa??*

A Flona de Jamari apresentou biomassa média de  $204,2 \pm 20 \text{ Mg ha}^{-1}$  e a Flona de Jacundá apresentou média de  $186,9 \pm 17,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Houve redução significativa na quantidade de biomassa após a exploração. A redução em biomassa foi de aproximadamente  $7,61 \text{ Mg ha}^{-1}$  na Flona de Jamari e  $1,93 \text{ Mg ha}^{-1}$  na Flona de Jacundá.

Também houve correlação significativa entre redução da biomassa e a intensidade de exploração, embora a capacidade de explicação tenha sido baixa.

4.1.3. *Como se comporta a dinâmica do estoque de carbono acima do solo nas Flonas de Rondônia, ao longo do tempo, após a exploração de impacto reduzido? Existe diferença significativa no estoque e no incremento de carbono acima do solo entre uma área com floresta explorada e uma área não explorada??*

Observou-se que o tempo influenciou no incremento de carbono, mas, não influenciou nas quantidades de carbono total estocado entre os anos. A quantidade de carbono entre a área explorada e áreas não exploradas foi aproximadamente 28% menor, entretanto, a floresta explorada manteve a sua capacidade de resgate de carbono, estocando o dobro ( $2,82 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) de carbono ao final do período avaliado quando comparada as áreas com floresta não explorada ( $1,52$  e  $0,95 \text{ Mg ha}^{-1}$ ).

## 5. Referências Bibliográficas

AMISSAH, L. et al. Rainfall seasonality and drought performance shape the distribution of tropical tree species in Ghana. **International Journal of Business Innovation and Research**, v. 17, n. 3, p. 8582–8597, 2018.

ASNER, G. P.; KELLER, M.; SILVA, J. N. M. Spatial and temporal dynamics of forest canopy gaps following selective logging in the eastern Amazon. **Global Change Biology**, v. 10, p. 765-783, 2004.

ASNER, G. P.; KNAPP, D. E.; BROADBENT, E. N.; OLIVEIRA, P. J. C.; KELLER, M. SILVA, J. N. Selective logging in the Brazilian Amazon. **Science**, n. 310, p. 480–482, 2005.

ASNER, G.P., KELLER, M., LENTINI M., MERRY, F., SOUZA Jr, C. Selective logging and its relation to deforestation. **Geophysical Monograph Series**, 25–42, 2009. Doi:10.1029/2008gm000723

BARRETO, P. et al. Costs and benefits of forest management for timber production in eastern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 108, p. 9–26, 1998.

BECKNELL, J. M. et al. Landscape-scale lidar analysis of aboveground biomass distribution in secondary Brazilian Atlantic Forest. **Biotropica**, v. 50, n. 3, p. 520–530, 2018.

BOLTZ, F.; HOLMES, T. P.; CARTER, D. R. Economic and environmental impacts of conventional and reduced-impact logging in Tropical South America: a comparative review. **Forest policy and economics**, v. 5(1), p. 69–81, 2003.

CHAVE, J. et al. Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forest: results from a large census plot in Panama. **Journal of Ecology**, v. 91, n. 2, p. 240–252, 2003. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1046/j.1365-2745.2003.00757.x>>. Acesso em: 7 jan. 2019.

CHAVE, J. et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, v. 20, p. 3177–3190, 2014.

COLGAN, M. S.; ASNER, G. P.; SWEMMER, T. Harvesting tree biomass at the stand level to assess the accuracy of field and airborne biomass estimation in savannas. **Ecological Applications**, v. 23, n. 5, p. 1170–1184, 2013. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1890/12-0922.1>>. Acesso em: 2 fev. 2019.

COOMES, D. A., ŠAFKA, D., SHEPHERD, J., DALPONTE, M., & HOLDAWAY, R. Airborne laser scanning of natural forests in New Zealand reveals the influences of wind on forest carbon. **Forest Ecosystems**, 5, 1– 14. 2018.

D'OLIVEIRA, M. V. N. et al. Estimating forest biomass and identifying low-intensity logging areas using airborne scanning lidar in Antimary State Forest, Acre State, Western Brazilian Amazon. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 479–491, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712002179?via%3Dihub#!>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

DUBAYAH, R. et al. Land surface characterization using LiDAR remote sensing. **Gordon & Breach Science Publishers**. p. 25–38, 2000.

EDWARDS, D. P. et al. Maintaining ecosystem function and services in logged tropical forests. **Trends in Ecology & Evolution**. v. 29, n. 9, p. 511–520, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169534714001542>>. Acesso em: 21 jan. 2019.

ELLIS, P. et al. Mapping selective logging impacts in Borneo with GPS and airborne lidar. **Forest Ecology and Management**. v. 365, p. 184–196, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112716000219>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

REIS, L.P. et al. Crescimento de mudas de *Parkia gigantocarpa* ducke, em um sistema de enriquecimento em clareiras após a colheita de madeira. **Ciênc. Florest**, Santa Maria, v.24, n.2, p. 431-436, 2014. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1980-50982014000200431&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-50982014000200431&lng=en&nrm=iso)>. Acessado em 20/05/2019. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509814583>.

EMBRAPA. Protocolo de medição e estimativa de biomassa e carbono florestal. 1. ed. Colombo, **PR: Embrapa Florestas**, 2014. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/item/221>>. Acesso em: 7 jan. 2019.

ENGEL, V. L. Silvigênese, dinâmica de fragmentos e a conservação de florestas tropicais. UNESP-FEPAF. **Série Técnica Florestal**, v. 1, n. 1, p. 21, 1993.

ESPÍRITO-SANTO, F. D. B. et al. Size and frequency of natural forest disturbances and the Amazon forest carbon balance. **Nature Communications**, v. 5, p. ncomms4434, 2014. Disponível em: <<http://www.nature.com/doi/10.1038/ncomms4434>>. Acesso em: 6 nov. 2017.

Equipe Estatcamp (2014). Software Action. Estatcamp- Consultoria em estatística e qualidade, São Carlos - SP, Brasil. 2014. URL <http://www.portalaction.com.br/>.

FEARNSIDE, P. M. Amazonian deforestation and global warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon forest. **Forest Ecology and Management**, v. 80, n. 1–3, p. 21–34, 1996. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378112795036474>>. Acesso em: 7 jan. 2019.

FEARNSIDE, P. M. et al. Modelagem de desmatamento e emissões de gases de efeito estufa na região sob influência da rodovia manaus-porto velho ( BR-319 ) Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia ( INPA ), Manaus , Amazonas , Brasil Endereço atual : Greenpeace , Manaus , Amazon. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24 (2), p. 208–233, 2009.

FENG, Y. et al. Examining effective use of data sources and modeling algorithms for improving biomass estimation in a moist tropical forest of the Brazilian Amazon. **International Journal of Digital Earth**, v. 10, n. 10, p. 996–1016, 2017. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17538947.2017.1301581>>. Acesso em: 23 jan. 2019.

FERRAZ, A. et al. Airborne Lidar Estimation of Aboveground Forest Biomass in the Absence of Field Inventory. **Remote Sensing**, v. 8, n. 8, p. 653, 2016. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/8/8/653>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

FERREIRA, J. et al. Carbon-focused conservation may fail to protect the most biodiverse tropical forests. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 8, p. 744–749, 2018. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/s41558-018-0225-7>>. Acesso em: 21 jan. 2019.

FOODY, G. Remote sensing of tropical forest environments: Towards the monitoring of environmental resources for sustainable development. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, p. 4035–4046, 2003.

FRANCEZ, L. M. de B. et al. Influência da exploração florestal de impacto reduzido sobre as fases de desenvolvimento de uma floresta de terra firme, Pará, Brasil. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 4, p. 743–753, 2013.

GARCIA, M. et al. Impact of data model and point density on aboveground forest biomass estimation from airborne LiDAR. **Carbon Balance and Management**, v. 12, n. 1, p. 4, 2017. Disponível em: <<http://cbmjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13021-017-0073-1>>

GARRASTAZU, M. C. et al. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Florestas Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Manual de Orientação e uso do GPS de Navegação (Garmin 76MAP CSX). 2011. Disponível em: <<http://www.cnpf.embrapa.br/publica/seriedoc/edicoes/doc229.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2018.

GIANNICO, V.; LAFORTEZZA R.; JOHN, R.; SANESI, G.; PESOLA, L.; CHEN, J. Estimating Stand Volume and Above-Ground Biomass of Urban Forests Using LiDAR. **Remote Sensing**, v.8, n. 339, 14p., 2016.

GORGENS, E. B.; SILVA, A. G. P.; RODRIGUEZ, L. C. E. Lidar: Aplicações Florestais. 1. ed. Curitiba – Brasil, PR: CRV, 132 p, 2014. DOI: 10.24824/978854440105.7.

HENDRINSON, J. Damage – Controlled logging in managed tropical rain forests in Suriname. 1989. **Wageningen Agricultural University**, 1989.

HEROLD, M.; SKUTSCH, M. Monitoring, reporting and verification for national REDD + programmes: Two proposals. **Environmental Research Letters**, v. 6, n. 1, 2011.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. In: Seminário emissão x sequestro de co2 - uma nova oportunidade de negócios para o brasil. 1994, Rio de Janeiro. **Anais do Seminário emissão x sequestro de co2**. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro:CVRD, 1994.

HOLMES, T. P. et al. Financial and ecological indicators of reduced impact logging performance in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 163(1), p. 93–110, 2002.

HOUGHTON, R. Carbon emissions and the drivers of deforestation and forest degradation in the tropics. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 4, n. 6, p. 597–603, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877343512000723>>. Acesso em: 7 jan. 2019.

HOUGHTON, R. A.; SKOLE, D. L.; HACKLER, C. A. J. L. LAWRENCE, K.T. CHOMENTOWSKI, W. H. Annual Fluxes of Carbon from Deforestation and Regrowth in the Brazilian Amazon. **Nature**, v. 403, p. 301–304, 2000.

IBAMA. Plano de manejo da floresta nacional do Jamari - Rondônia. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-planos-de-manejo/flona\\_jamari\\_pm\\_planejamento.pdf](http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-planos-de-manejo/flona_jamari_pm_planejamento.pdf)>.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, Norma de Execução Nº 1, de 24 de abril de 2007 - Diretrizes Técnicas para Elaboração dos Planos de Manejo Florestal Sustentável – **PMFS. Diário Oficial da União – Seção 1** – 30/04/2007, Página 405.

ICMBIO. Plano de manejo da floresta nacional de Jacundá, localizada no estado de Rondônia. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-planos-de-manejo/flona\\_jacunda\\_pm\\_voll.pdf](http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-planos-de-manejo/flona_jacunda_pm_voll.pdf)>.

IFT. Manejo Florestal e Exploração de Impacto Reduzido em Florestas Naturais de Produção da Amazônia. Ift, v. Informativo, p. 31, 2014.

IPCC. Climate Change, Adaptation, and Vulnerability. **Organization & Environment**, v. 24, n. March, p. 1–44, 2014. Disponível em: <<http://oae.sagepub.com/cgi/content/abstract/24/3/269>>

JARDIM, F. C. da S.; QUADROS, L. C. L. Estrutura de uma floresta tropical dez anos após exploração. **Revista Ceres**. v. 63, n. 4, p. 427–435, 2016.

JENSEN, J. R. et al. Discrete return LiDAR-based prediction of leaf area index in two conifer forests. **Remote Sensing of Environment**. v. 112, n. 10, p. 3947–3957, 2008.

JENSEN, J. R. Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres. In: Tradução da 2a ed. EPIPHANIO, J. C. N. (org.). 2. ed. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009. p. 672.

JOHNSON, M. O. et al. Variation in stem mortality rates determines patterns of above-ground biomass in Amazonian forests: implications for dynamic global vegetation models. **Global Change Biology**. v. 22, n. 12, p. 3996–4013, 2016. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/gcb.13315>>. Acesso em: 21 jan. 2019.

KNAPP, N.; FISCHER, R.; HUTH, A. Linking lidar and forest modeling to assess biomass estimation across scales and disturbance states. **Remote Sensing of Environment**, v. 205, p. 199–209, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425717305679>>. Acesso em: 19 nov. 2018.

LEI, Y. et al. Quantification of selective logging in tropical forest with spaceborne SAR interferometry. **Remote Sensing of Environment**. v. 211, p. 167–183, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425718301548#bb0140>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

LEITOLD, V. & KELLER, M. & MORTON, D. & D COOK, B. & SHIMABUKURO, Y. Airborne lidar-based estimates of tropical forest structure in complex terrain: Opportunities and trade-offs for REDD+. **Carbon balance and management**. 2015. DOI:10.3.10.1186/s13021-015-0013-x.

LENTINI, M. W.; ZEWEED, J. C.; HOLMES, T. P. Measuring Ecological Impacts from Logging in Natural Forests of the Eastern Amazônia as a Tool to Assess Forest Degradation. **Forest Resources Assessment Working Paper 165**, Rome, Italy, 2009.

LOCKS, C. J. **Aplicações da tecnologia LiDAR no monitoramento da exploração madeireira em áreas de concessão florestal**. PPGEFL.DM-288/2017. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97p, 2017.

LONGO, M. et al. Aboveground biomass variability across intact and degraded forests in the Brazilian Amazon. **Global Biogeochemical Cycles**. v. 30, n. 11, p. 1639–1660, 2016.

MALHI, Y.; BALDOCCHI, D. D.; JARVIS, P. G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. **Plant, Cell and Environment**. v. 22, p. 715–740, 1999. Disponível em: <[https://nature.berkeley.edu/biometlab/pdf/mahli\\_pce\\_1998\\_22\\_715.pdf](https://nature.berkeley.edu/biometlab/pdf/mahli_pce_1998_22_715.pdf)>. Acesso em: 10 jan. 2019.

MARTIN, P. A. et al. Impacts of tropical selective logging on carbon storage and tree species richness: A meta-analysis. **Forest Ecology and Management**. v. 356, p. 224–233, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112715003837>>. Acesso em: 21 jan. 2019.

MATRICARDI, E. A. T. **Spatiotemporal dynamics of forest degradation by selective logging and forest Fire in the Brazilian amazon**. Dissertation. Michigan State University. 269 p., 2007.

MATRICARDI, E. A. T.; SKOLE, D. L.; PEDLOWSKI, M. A.; CHOMENTOWSKI, W. Assessment of forest disturbances by selective logging and forest fires in the Brazilian Amazon using Landsat data. **International Journal of Remote Sensing**, v.34, n.4, p.1057–1086, 2013.

MAZZEI, L. et al. Above-ground biomass dynamics after reduced-impact logging in the Eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**. v. 259, n. 3, p. 367–373, 2010. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112709007737>>

MCGAUGHEY, R. J. FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. **United States Department of Agriculture**. Forest Service, 2010.

MELLO-IVO, W. M. P. De; ROSS, S. Efeito da colheita seletiva de madeira sobre algumas características físicas de um latossolo amarelo sob floresta na Amazônia Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 30, n. 5, 2006.

MEYER, V. et al. Detecting tropical forest biomass dynamics from repeated airborne lidar measurements. **Biogeosciences**, v. 10, n. 8, p. 5421–5438, 2013.

MUHLBAUER, E. J. **Plano Operacional Anual 2017**, PMFS - UMF n.I - Flona do Jamari, Madeflona Industrial Madeireira LTDA. Itapuã D'Oeste - Rondônia.

NOBRE, C. A.; NOBRE, A. D. O balanço de carbono da Amazônia brasileira. **Estudos Avançados**, [s. l.], v. 16, n. 45, p. 81–90, 2002. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40142002000200006&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142002000200006&lng=pt&tlng=pt)>. Acesso em: 7 jan. 2019.

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **J. Clim**, v. 4, p. 957–988, 1991.

PAN, Y. Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P. E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R. B., Pacala S.W., McGuire D., Piao S., Rautiainen A., Sitch S., Haye D. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. **Research articles**. *Science*, v. 333, n. August, p. 988–994, 2011.

PENMAN, J. et al. Intergovernmental Panel on Climate Change Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry: **The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**, 2003.

PINAGÉ, E. R.; MATRICARDI, E. A. T. Detecção da Infraestrutura para Exploração Florestal em Rondônia Utilizando Dados de Sensoriamento Remoto. **Floresta e Ambiente**, v. 22(3), p. 377-390, 2015

PIPONIOT, C. et al. Assessing timber volume recovery after disturbance in tropical forests – A new modelling framework. **Ecological Modelling**, v. 384, n. December 2017, p. 353–369, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.05.023>>

POORTER, L. et al. Biodiversity and climate determine the functioning of Neotropical forests. **Global Ecology and Biogeography**, v. 26, n. 12, p. 1423–1434, 2017.

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; NELSON, R. F. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p. 564–577, 2003.

PUTZ, F. E. et al. Reduced-impact logging: Challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, n. September, p. 1427–1433, 2008. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/foreco%0AReduced-impact](http://www.elsevier.com/locate/foreco%0AReduced-impact)>

QU, Y. et al. Remote sensing of leaf area index from LiDAR height percentile metrics and comparison with MODIS product in a selectively logged tropical forest area in Eastern Amazonia. **Remote Sensing**, v. 10, n. 6, 2018.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing, 2017. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>

RIBEIRO, S. C. et al. Quantificação de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma floresta madura no município de Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, [s. l.], v. 33, n. 5, p. 917–926, 2009.

RICE, A. H. et al. Carbon Balance and Vegetation Dynamics in an Old-Growth Amazonian Forest. **Ecological Applications**, v. 14, n. 4, p. S55–S71, 2004. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/4493630>>

SATO, L. Y. et al. Post-fire changes in forest biomass retrieved by airborne LiDAR in Amazonia. **Remote Sensing**, v. 8, n. 10, 2016.

SCHWARTZ, G.; FALKOWSKI, V.; PEÑA-CLAROS, M. Natural regeneration of tree species in the Eastern Amazon: Short-term responses after reduced-impact logging. **Forest Ecology and Management**, v. 385, p. 97–103, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.11.036>>

SEEG & OCF. Análise das Emissões de GEE Brasil (1970-2014) e suas Implicações para Políticas Públicas e a Contribuição Brasileira para o Acordo de Paris. **Documento Síntese**. p. 85, 2016. Disponível em: <<http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2016/09/WIP-16-09-02-RelatoriosSEEG-Sintese.pdf>>

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Gestão de Florestas Públicas - Relatório 2015. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/noticias-do-sfb/relatorio-apresenta-conquistas-na-gestao-das-florestas-publicas>>.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Contextualização ambiental, geográfica e social da Flona do Jamari e entorno. Edital nº 01/2012.

SHAO, G. et al. Improving Lidar-based aboveground biomass estimation of temperate hardwood forests with varying site productivity. **Remote Sensing of Environment**. v. 204, p. 872–882, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717304248>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

SINGH, M. et al. Incorporating Canopy Cover for Airborne- Derived Assessments of Forest Biomass in the Tropical Forests of Cambodia. p. 1–14, 2016.

SOUZA, D. V. et al. Crescimento de espécies arbóreas em uma floresta natural de terra firme após a colheita de madeira e tratamentos silviculturais, no município de paragominas, Pará, Brasil. **Ciencia Florestal**, v. 25, n. 4, p. 873–883, 2015.

UNFCCC. Methodological guidance for activities relating to reducing emissions from deforestation and forest degradation and the role of conservation, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks in developing countries. Copenhagen.

Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/eng/11a01.pdf#page=11>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

UNFCCC. Copenhagen Accord: Report of the Conference of the Parties on its fifteenth session. p. 1–43, 2010.

UNITED NATIONS. Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol on its second session , held at Nairobi from 6 to 17 November 2006 Part Two : Action taken by the Conference of the Parties serving as the meeting o. In: **Conference of the parties serving as the meeting of the parties to the kyoto protocol**, Nairobi. Anais, 2007.

UNITED STATES FOREST SERVICE – USFS. First Order Lidar Metrics: A supporting document for LiDAR deliverables. U.S. Department of Agriculture, **Forest Service**, v. Pacific No, 2014.

VALDEZ PÉREZ, M. E. et al. Reserva de carbono en biomasa forestal y suelos minerales en el Parque Nacional Malinche (México). **Revista Colombiana de Geografía**. v. 25, p. 207–215, 2016.

VAN DER SANDE, M. T. et al. Biodiversity in species, traits, and structure determines carbon stocks and uptake in tropical forests. **Biotropica**. v. 49, n. 5, p. 593–603, 2017. a.

VAN DER SANDE, M. T. et al. Abiotic and biotic drivers of biomass change in a Neotropical forest. **Journal of Ecology**, v. 105, n. 5, p. 1223–1234, 2017. b.

VERÍSSIMO, A.; LIMA, E.; LENTINI, M. Pólos madeireiros do estado do Pará. **IMAZON**, Belém, p. 72, 2002.

VIDAL, E.; VIANA, M.; FERREIRA BATISTA, J. Crescimento de floresta tropical três anos após colheita de madeira com e sem manejo florestal na Amazônia oriental. **Scientia Forestalis**, n. 61, p. 133–143, 2002.

WAGNER, W. et al. From single-pulse to fullwaveform airborne laser scanners: potential and practical challenges. **In: ISPRS CONGRESS 2004**, Istanbul, Turkey. Anais. Istanbul, Turkey: Geo-Imagery Bridging Continents: proceedings, 2004.

WANG, X., QI, G., LEWIS, B. J., YU, D., ZHOU, L., QI, L., WANG, Y., LI, G., DAI, L., SU, D. Research paper Spatiotemporal Variations in Biomass Carbon Storage for Three Forest Management Regimes in Northeast China. **Taiwan J For Sci** 26(1): 45-58, 2011.

WWF. Zero Net Deforestation by 2020 - **A WWF Briefing Paper**. Disponível em: <[http://awsassets.panda.org/downloads/wwf\\_2020\\_zero\\_net\\_deforest\\_brief.pdf](http://awsassets.panda.org/downloads/wwf_2020_zero_net_deforest_brief.pdf)>.

ZANNE AE, LOPEZ-GONZALEZ G, COOMES DA, ILIC J, JANSEN S, LEWIS SL, MILLER RB, SWENSON NG, WIEMANN MC, CHAVE J. Global Wood Density Database. Data from: **Towards a worldwide wood economics spectrum**, 2009. Dryad Digital Repository. <https://doi.org/10.5061/dryad.234>

ZHANG, Z.; CAO, L.; SHE, G. Estimating Forest Structural Parameters Using Canopy Metrics Derived from Airborne LiDAR Data in Subtropical Forests. **Remote Sensing**. v. 9, n. 9, p. 940, 2017. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/9/9/940>>

ZOLKOS, S. G.; GOETZ, S. J.; DUBAYAH, R. A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 128, p. 289–298, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425712004051?via%3Dihub>>. Acesso em: 20 nov. 2018.